LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES OCEANS

UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

MOUILLAGES

Techniques des mouillages utilisés en océanographie

Décembre 2001

Jean-Pierre GIRARDOT

girardot@univ-brest.fr

U.F.R. Sciences et Techniques

6 avenue le Gorgeu

BP 809 – 29285 Brest cedex

France

Girardot@univ-brest.fr

Tel 02 98 01 62 18

Fax 02 98 01 64 68

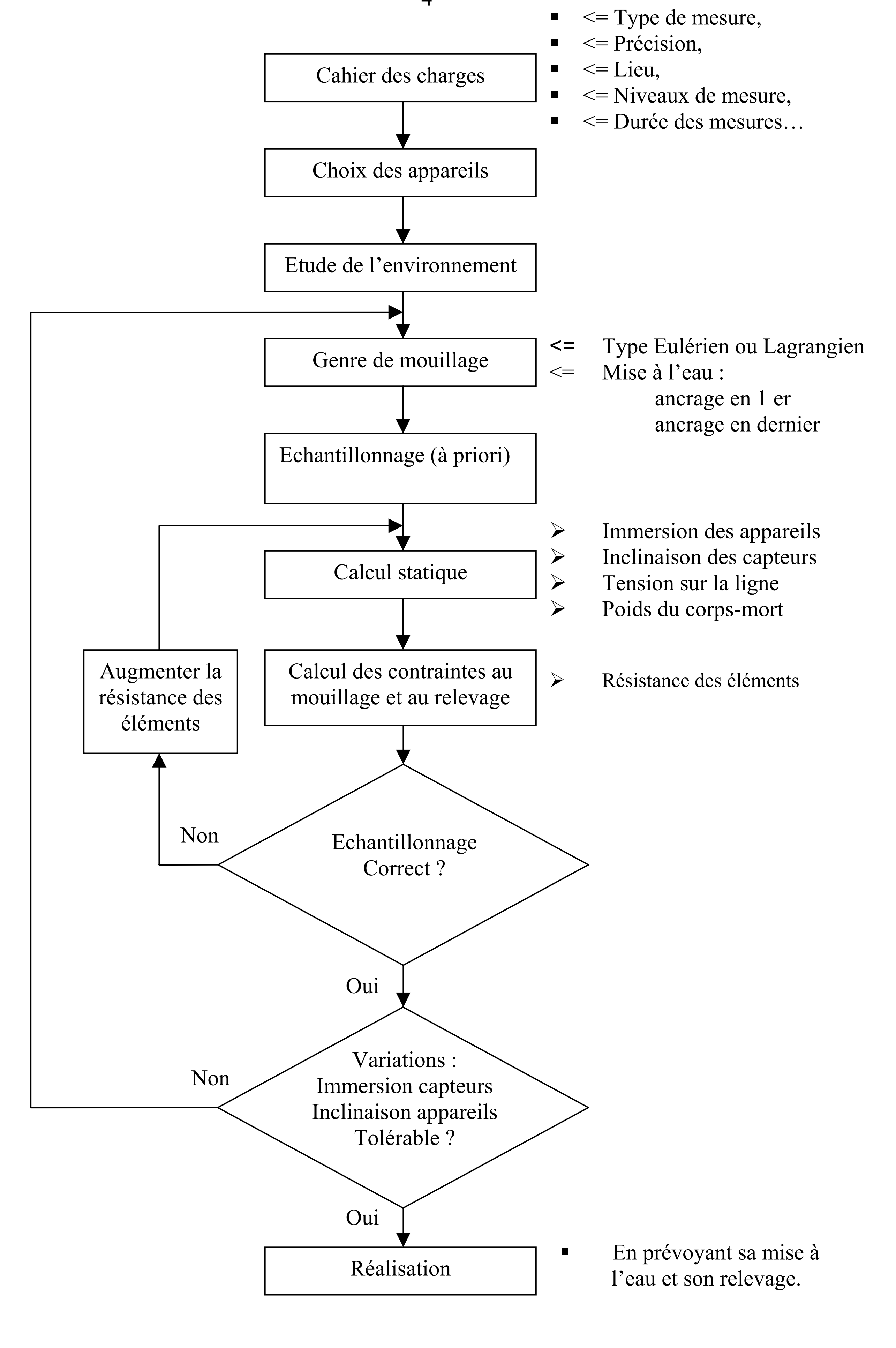
INTRODUCTION

L'océanographie physique, qui étudie les phénomènes observés en mer, est avant tout une science expérimentale. Les premières mesures de ces phénomènes ont été réalisées au cours d'explorations à partir de navires plus ou moins spécialisés. Il est apparu que certaines de ces mesures n'étaient possibles qu'à partir d'un navire au point fixe. Aussi, dès que l'on a su fabriquer des appareils autonomes, ils ont été placés sous des bouées ancrées sur le fond. Dans d'autres cas, il s'est avéré plus intéressant de laisser l'ensemble dériver avec les courants.

Nous entendons donc par "mouillage", toute ligne instrumentée ou non, possédant une flottabilité de surface ou de subsurface. Elle peut être soit en dérive, soit solidaire du fond par l'intermédiaire d'un corps-mort ou d'une ancre.

Alors qu'avant, la mesure en océanographie physique était ponctuelle dans le temps et dans l'espace, elle s'oriente vers l'observation d'une zone étendue et vers le suivi de phénomènes pendant de longues périodes. Les mouillages permettent la mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer, des courants, des sédiments en suspension... Ils sont aussi utilisés dans de nouveaux domaines comme la tomographie acoustique ou le suivi de flotteurs lagrangiens. Leur importance reste essentielle et leur utilisation de plus en plus courante pour des temps de plus en plus longs.

La réussite des mesures obtenues à partir des mouillages résulte essentiellement de la conjonction d'une étude théorique et de l'emploi d'une multitude de "recettes" issues de l'expérience. C'est ce que nous allons essayer de vous présenter ici.


<= Type de mesure,
<= Précision,
<= Lieu,
<= Niveaux de mesure,
<= Durée des mesures…
Cahier des charges
Choix des appareils
Etude de l'environnement
Genre de mouillage
<= Type Eulérien ou Lagrangien
<= Mise à l'eau :
ancrage en 1 er
ancrage en dernier
Echantillonnage (à priori)
Immersion des appareils
Inclinaison des capteurs
Tension sur la ligne
Poids du corps-mort
Calcul statique
Augmenter la résistance des éléments
Calcul des contraintes au mouillage et au relevage
Résistance des éléments
Non
Echantillonnage Correct ?
Oui
Non
Variations :
Immersion capteurs
Inclinaison appareils
Tolérable ?
Oui
Réalisation
En prévoyant sa mise à l'eau et son relevage.

- I - PRELIMINAIRE A LA REALISATION D'UN MOUILLAGE

Afin de déterminer l'échantillonnage des différents éléments qui vont composer une ligne de mouillage, il est nécessaire d'avoir un maximum d'informations concernant l'environnement expérimental de la zone à étudier, d'évaluer les forces auxquelles les composants seront soumis et d'estimer les contraintes lors de la mise à l'eau et de la récupération.

- I . 1 - ETABLISSEMENT DU CAHIER DES CHARGES

Dans un premier temps, il convient de déterminer quels sont les différents paramètres à mesurer pour le problème scientifique étudié. Ensuite, en fonction des moyens disponibles, il faut définir :

- la durée des mesures et la fréquence des acquisitions,
- le type d'appareil susceptible de fournir les meilleurs résultats (choix de leurs enregistreurs et leurs capteurs),
- la position du mouillage et l'immersion des capteurs.

- I . 2 - PREMIERES ETUDES

Il peut être indispensable d'étudier l'environnement local :

- Conditions météorologiques (vent, houle, risque de brouillard).
- Profondeur, nature et déclivité du fond, courants et marnage.

Il faut également savoir si le mouillage est autorisé dans la zone retenue (de toute façon, en cas de travaux dans la zone d'intérêt économique, il faudra, en France, obtenir l'aval de la préfecture maritime et des affaires maritimes ou des organismes équivalents pour l'étranger), prévenir éventuellement les pêcheurs, tenir compte des attaques possibles de la faune locale sur les câbles, envisager les méthodes de mise à l'eau et de récupération du matériel, estimer les tensions, enfin simuler le comportement de la ligne de mouillage sur ordinateur à l'aide d'un programme approprié.

- II - PRINCIPE DE LA MODELISATRION DES MOUILLAGES

- II . 1 - GENERALITES

Un objet sans mouvement par rapport à l'eau de mer dans laquelle il est immergé est soumis à 3 forces :

- Son poids qui est dû à la pesanteur sur sa masse. Il est appliqué au centre de gravité CG,
- la poussée d'Archimède qui est égale au poids du volume d'eau déplacé par le corps et qui est appliquée au centre de carène CC,
- et une troisième force f qui permet au corps de rester en équilibre. Elle compense la flottabilité du corps ou son poids dans l'eau :

$$m\vec{g} - \rho V_0 \vec{g} + \vec{f} = 0$$

avec : m : masse du corps en Kg
g : accélération de la pesanteur en m/s^2
ρ : masse volumique de l'eau de mer en Kg/m^3
V_o : volume d'eau déplacée en m^3
F : Force en N qui compense la flottabilité du corps ou son poids dans l'eau.

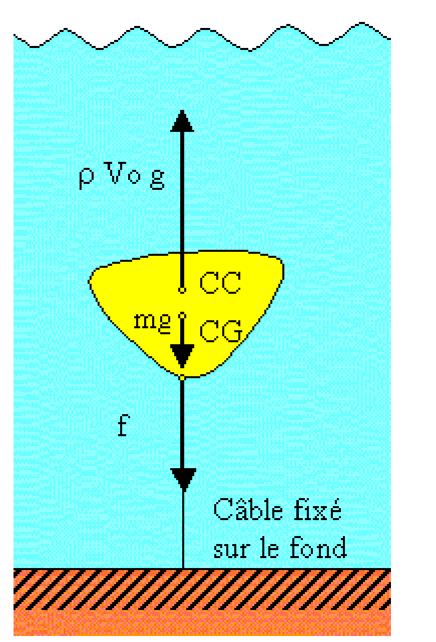


Figure 1 : V = 0

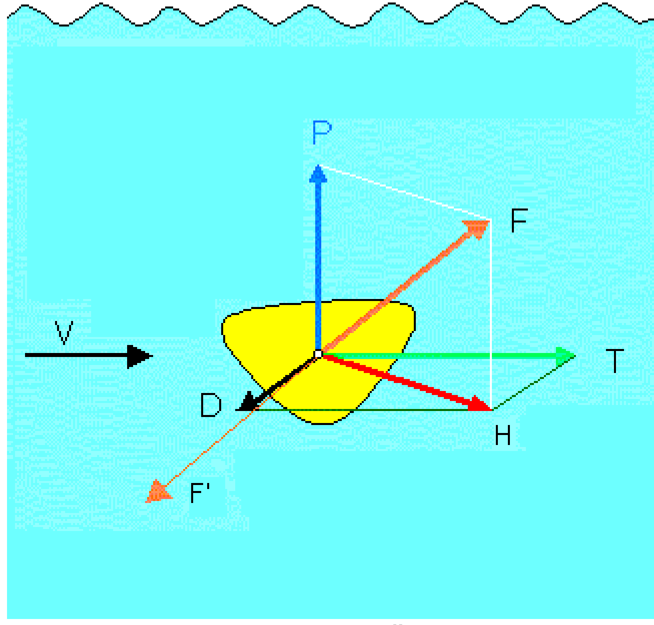


Figure 2 : V # 0

S'il y a un courant de vitesse **V** par rapport à l'objet, il apparaît une nouvelle force **F** qui s'ajoute aux forces vues précédemment. Cette force dont la direction est quelconque se décompose en une force verticale **P** appelée portance et une force horizontale F'. F' se décompose à son tour dans le plan horizontal en une force **D** normale à V qui s'appelle la force de dérive et une force **T** qui a la même direction que la vitesse V. Elle est appelée la force de traînée.

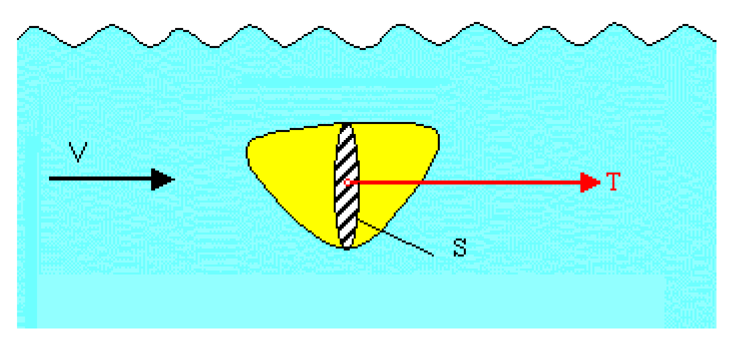


Figure 3 : Force de trainée

En ce qui concerne les mouillages océanographiques, seule la connaissance de la force de traînée T est utile. Elle s'exprime :

$$\vec{T} = 1/2 \rho C S |V| \vec{V}$$

avec : T Force de traînée en N

ρ Masse volumique du fluide en Kg/m^3

C Coefficient de traînée (sans dimension)

S Section normale au courant en m²

V Vitesse du courant en m/s

Ordre de grandeur du coefficient de traînée

Nous ne nous intéresserons qu'à deux formes géométriques simples, le cylindre et la sphère. Nous donnons ci-dessous une valeur approchée du coefficient de traînée ainsi que la section normale à l'écoulement dans trois cas :

1) Cylindre dont l'axe est perpendiculaire à la direction du courant
2) Cylindre dont l'axe est dans la direction du courant
3) Sphère (dans ce dernier cas la direction du courant est sans importance).

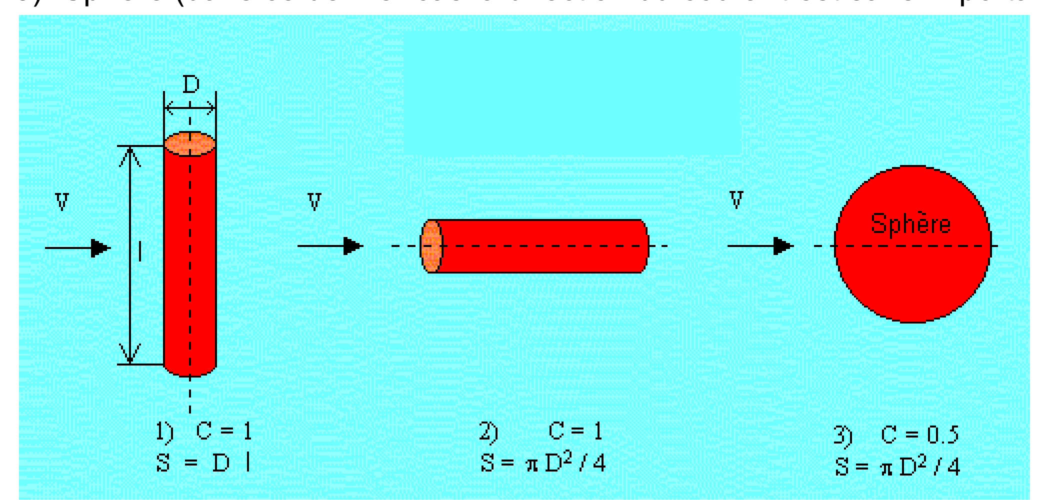


Figure 4 : Coefficient de traînée des cylindres et des sphères

Les écoulements sont caractérisés par le nombre de Reynolds. Le coefficient de traînée varie avec ce nombre qui s'exprime :

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu}$$

Avec :
V : vitesse du courant en m/s,
D : dimension de l'élément qui peut être son diamètre en m,
ρ : masse volumique en Kg/m^3,
t : température en degrés Celsius,
μ : viscosité dynamique de l'eau en Poiseuilles (Pl).

Viscosité dynamique de l'eau de mer à pression atmosphérique en milli Poiseuille (mPl). La viscosité varie peu avec la pression.							
	TEMPERATURE						
Salinité	0	5	10	15	20	25	30
0	1.79	1.52	1.31	1.14	1.01	0.89	0.80
10	1.82	1.55	1.34	1.17	1.03	0.91	0.82
20	1.85	1.58	1.36	1.19	1.05	0.93	0.84
30	1.88	1.60	1.38	1.21	1.07	0.95	0.86
35	1.89	1.61	1.39	1.22	1.09	0.96	0.87

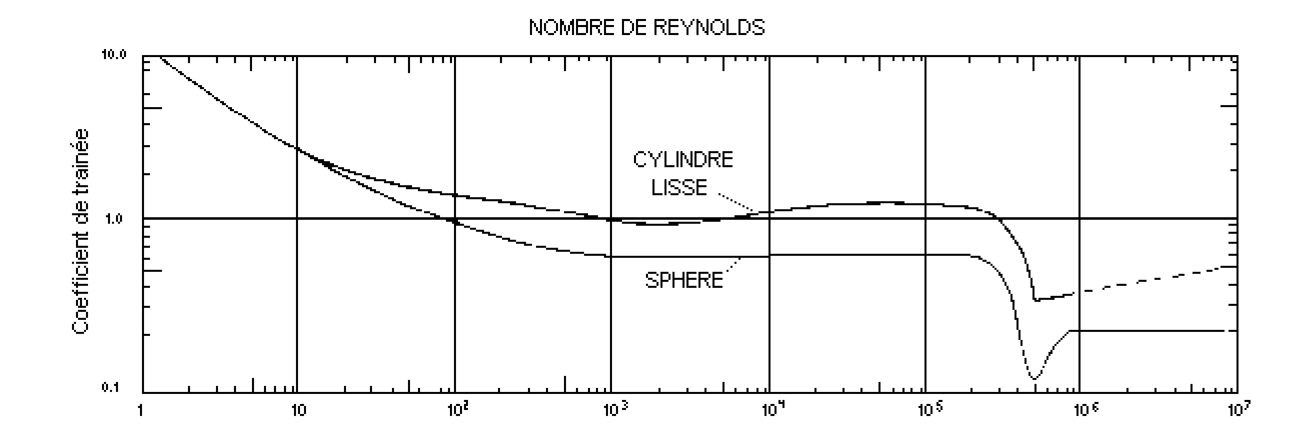


Figure 5 : Coefficient de traînée d'un cylindre et d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds

Théoriquement il existe un nombre de Reynolds critique aux environs de 2320. En dessous de cette valeur l'écoulement est laminaire, au-dessus, il est turbulent. Cela correspond à un léger minimum sur les courbes ci-dessus.

Un autre phénomène dû à la turbulence produit une diminution du coefficient de traînée lorsque le nombre de Reynolds dépasse $2\ 10^5$. En ce qui concerne les lignes de mouillage, mis à part pour des éléments volumineux placés dans de forts courants, nous sommes en dessous de cette valeur.

Pour des nombres de Reynolds inférieurs à 10^3 les forces de traînée sont si faibles qu'elles n'ont pratiquement pas d'influence sur les mouillages.

Nous pouvons donc considérer que pour des nombres de Reynolds compris entre 10^3 et $2\ 10^5$ le coefficient de traînée est presque constant. Comme nous l'avons vu précédemment, son ordre de grandeur est de 1 pour un cylindre et 0.5 pour une sphère.



Figure 6 : COEFFICIENT DE TRAINEE DE PRESSION D'UN CABLE

Coefficient de traînée

10

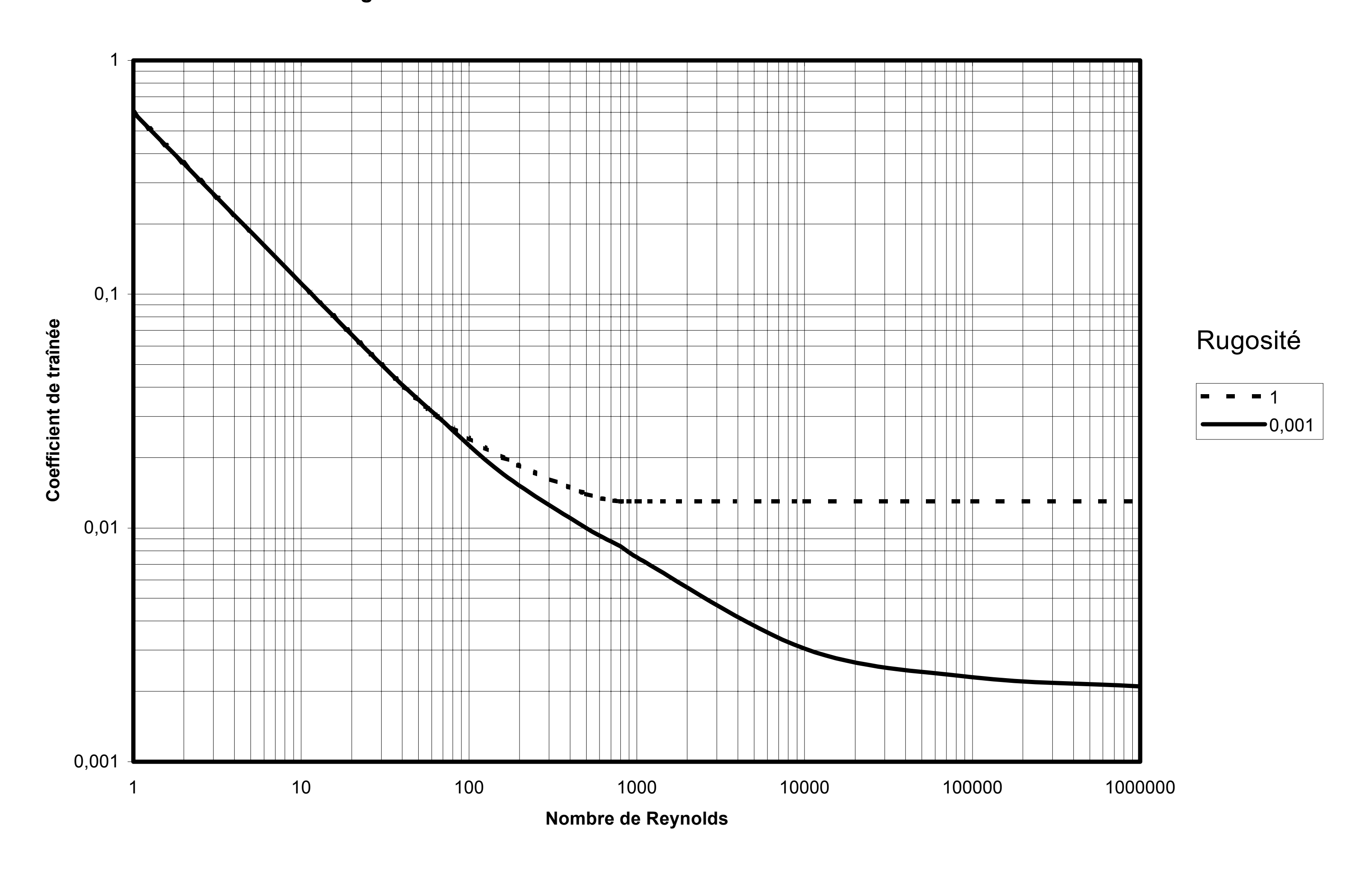
1

0,1

1,00E+00 1,00E+01 1,00E+02 1,00E+03 1,00E+04 1,00E+05 1,00E+06

Nombre de Reynolds

Figure 7 : COEFFICIENTS DE TRAINEE DE FRICTION DE CABLES



Comme nous l'avons dit, l'écoulement exerce sur l'objet une force de traînée T

- Elle est due à la pression du fluide sur l'avant de l'objet et à la dépression à l'arrière de l'objet. Il s'agit de la traînée de pression Tp.

$$\vec{T}p = \frac{1}{2}\rho\, Cp\, S |V| \vec{V}$$

où Cp est le coefficient de traînée de pression.

- Elle est également due au frottement du fluide sur la surface de l'objet, c'est la traînée de frottement appelée aussi friction Tf.

$$\vec{T}f = \frac{1}{2}\rho\, Cf\, Sm |V| \vec{V}$$

où Sm est la surface de l'objet en contact avec le fluide en m^2 que nous appelons « surface mouillée » et Cf est le coefficient de traînée de frottement. Ce coefficient varie avec l'état de surface de l'objet qui est défini par sa la rugosité.

Nous avons donc :

$$\vec{T} = \vec{T}p + \vec{T}f$$

Généralement la traînée de pression est grande devant la traînée de friction et seule la première est prise en considération. Cependant dans certains cas, comme par exemple lorsqu'un bateau remorque un câble non pesant dans l'eau, la traînée de frottement est prépondérante. Dans ce cas nous avons :

$$\vec{T} \cong \vec{T}f = \frac{1}{2}\rho Cf\, \pi D L |V| \vec{V}$$

où D est le diamètre du câble et L sa longueur immergée.

Le plus souvent le câble est oblique. Il forme un angle α avec la verticale.

Regardons quelles sont les forces qui s'appliquent sur une portion de câble de longueur ΔL et diamètre D.

Décomposons le vecteur vitesse du courant V en :

=> Un vecteur vitesse Vn normal à l'axe du câble et

=> Un vecteur vitesse Vt tangent au câble.

Figure 8 : Décomposition du vecteur vitesse

Nous trouvons 2 forces de traînée :

=> une de traînée de pression normale à l'axe du câble :

$$\vec{T}n = \frac{1}{2}\rho\, Cp\, D\, \Delta L \left|Vn\right| \vec{V}n$$

=> et d'après H. Berteaux une traînée de frottement axiale de même direction que Vt :

$$\vec{T}t = \frac{1}{2}\rho\, Cf\, \pi\, D\, \Delta L \left|Vt\right| \vec{V}t$$

ou, d'après S. F. Hoerner, une traînée de friction qui conserve la même direction que le courant :

$$\vec{T}f = \frac{1}{2}\rho\, Cf\, \pi\, D\, \Delta L \left|V\right| \vec{V}$$

Comme en général le câble est peu incliné et que le coefficient de traînée de friction est petit devant le coefficient de traînée de pression, la force de traînée de friction est faible en comparaison avec la traînée de pression.

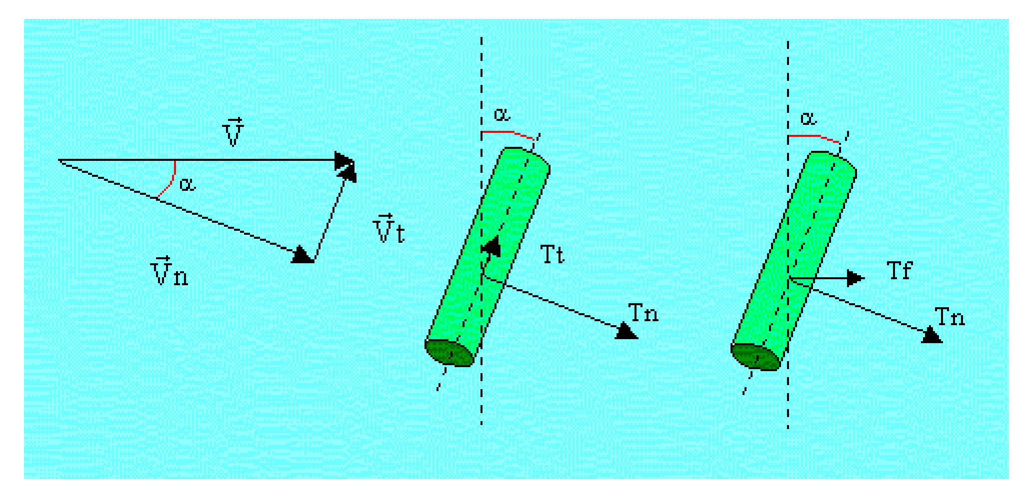


Figure 9 : Cas d'un cylindre incliné

- II . 2 - METHODE DE CALCUL UTILISEE PAR CALM

CALM (Conception Assistée des Lignes de Mouillage) est un logiciel qui permet de simuler le comportement des mouillages en deux dimensions et en statique.

Le programme calcule les forces qui s'exercent sur chaque élément de la ligne de mouillage, en commençant par l'élément le plus haut, généralement un flotteur, pour se terminer par le corps-mort. Il en déduit leur position. Lorsqu'il s'agit d'un élément souple comme un câble, une chaîne... il le sectionne en un nombre de segments tel qu'entre chacun d'eux la variation d'inclinaison soit de l'ordre du degré.

Pour chaque élément ou segment incliné d'un angle α par rapport à la verticale, le logiciel décompose le vecteur vitesse du courant en deux composantes :

l'une normale à l'élément de module $Vn = V\cos\alpha$

et l'autre tangente à l'élément de module $Vt = V\sin\alpha$

Ces deux composantes génèrent deux forces Tn(i) et Tt(i). Une autre force P(i) est due au poids dans l'eau du segment (ou à sa flottabilité). Ces forces se composent avec la tension au-dessus de l'élément F(i) pour donner une force résultante F(i+1) qui est la tension appliquée à l'élément inférieur « i+1 ».

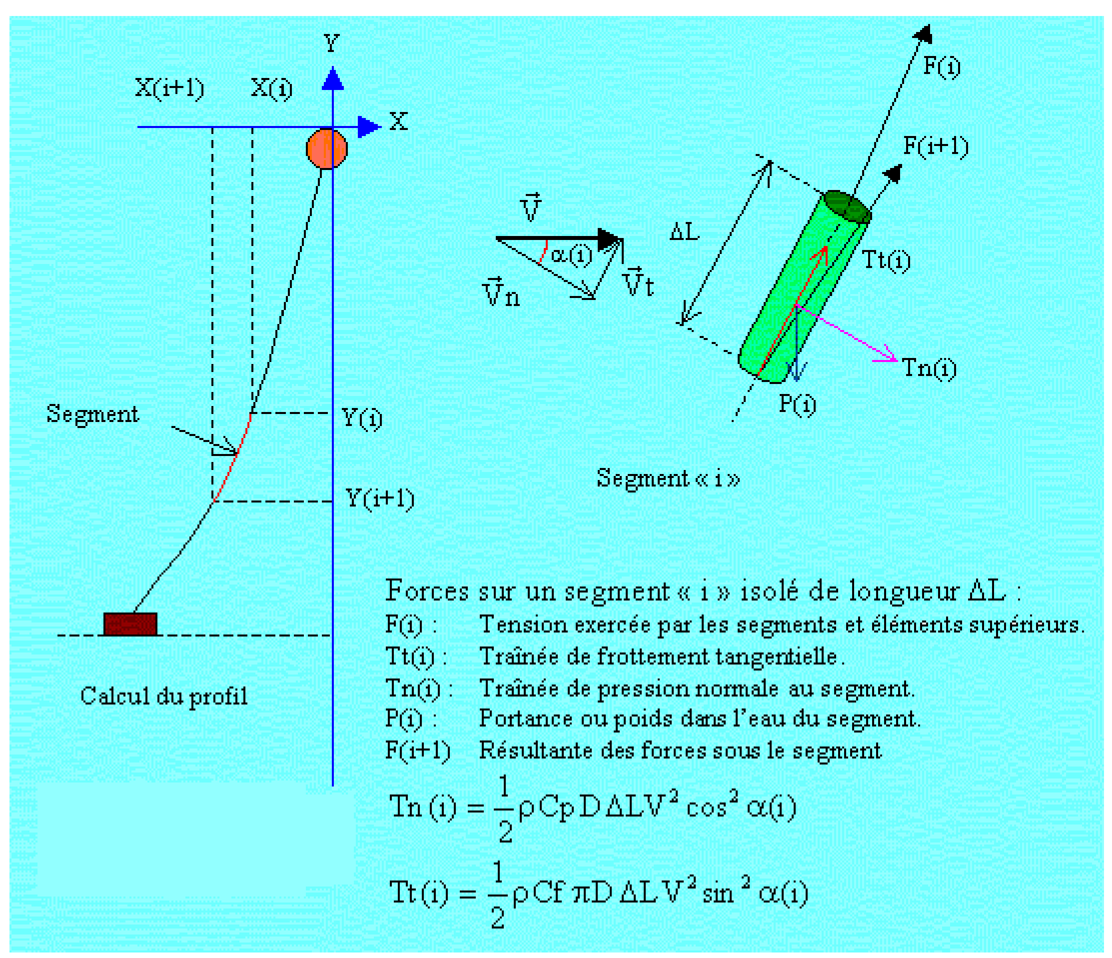


Figure 10 : Cas d'une ligne de mouillage

CAS D'UN MOUILLAGE DE SUB-SURFACE

Dans un premier temps l'ordinateur considère que le courant est nul. Le mouillage est donc parfaitement vertical (figure 11A).

Ensuite, à partir des coordonnées de la bouée de surface qui servent de référence, le calcul est repris en tenant compte du courant réel.

La courbure de la ligne ne permet plus alors au corps-mort de toucher le fond (figure 11B). L'ensemble du mouillage est translaté vers le bas jusqu'à ce que le corps-mort soit sur le fond (figure 11C). Comme le courant n'est pas toujours homogène sur la verticale, le calcul est repris tant que l'erreur est supérieure à 2/10000.

CAS D'UN MOUILLAGE DE SURFACE

Dans le cas d'une bouée de surface, la flottabilité utilisée Fu est ajustée au 1/1024 ième pour la maintenir en surface. Il existe en général une réserve de flottabilité correspondant à la différence entre la flottabilité totale de la bouée et la flottabilité utilisée. Mais dans ce cas, la traînée de la bouée n'est pas ajustée en fonction de son immersion. Elle est considérée comme totalement immergée.

Si l'utilisateur juge que l'erreur ainsi induite est trop importante, il peut introduire une autre force de traînée pour cette bouée, lorsqu'elle est ainsi immergée dans un courant de 1 m/s .

ELEMENTS RIGIDES

Pour la plupart des mouillages, la traînée due aux éléments rigides est faible vis à vis de celle sur les éléments souples. En effet, si les coefficients de traînée sont du même ordre de grandeur dans ces deux cas, le rapport entre les sections qu'ils opposent au courant montre que l'influence des éléments souples est prépondérante, et cela d'autant plus que le mouillage est long. Les erreurs sur l'approximation de la traînée sur les éléments rigides auront donc moins d'influence que celles sur les éléments souples sur l'approche du comportement de la ligne de mouillage.

Nous distinguons 3 types d'éléments rigides selon que l'élément est une sphère, s'il s'incline avec la ligne de mouillage ou s'il est insensible à son inclinaison.

- Cas d'une sphère :

Le programme demande le diamètre de la sphère, puis
propose un coefficient de train,e Cx = .5 .

Suivant les auteurs, il est possible de trouver des valeurs légèrement différentes allant de ".4" à ".6" . Nous avons retenu une valeur moyenne. Cette valeur reste constante pour des nombres de Reynolds allant de 1 000 à 200 000. Ce qui correspond aux conditions généralement rencontrées pour les mouillages : en dessous de 1 000, les courants sont si faibles qu'ils n'ont plus

d'influence significative sur la ligne et des valeurs dépassant 200 000 ne sont rencontrées que pour des courants assez forts.

Par exemple, dans le cas d'une sphère de 40 cm de diamètre, pour des courants supérieurs à 1 nœud. Il convient alors de modifier la valeur de Cx ; cette possibilité est offerte par le programme.

C'est à partir de ces données que sont calculées les valeurs de Kn et de Kt. Evidemment Kn = Kt , puisque, pour une sphère, Cx ne change pas avec la direction du courant.

ELEMENTS SENSIBLES A L'INCLINAISON DE LA LIGNE :

Leur traînée varie avec l'inclinaison de la ligne de mouillage. Nous distinguons 2 sortes d'éléments : ceux qui sont cylindriques et dont l'axe est incliné comme la ligne de mouillage et les autres pour lesquels on doit fournir les forces de traînée pour 1 m/s ; "Kn" suivant la normale à la ligne et "Kt" suivant l'axe de celle-ci.

Les cylindres :

Le coefficient de traînée normale à l'axe d'un élément de grande longueur est d'environ 1.2, celui de la traînée axiale d'environ 1, lorsque le nombre de Reynolds est compris entre 10 000 et 200 000.

Ces coefficients de traînée sont ajustés en fonction du rapport entre la longueur du cylindre et son diamètre. Comme dans le cas de la sphère, lorsque le nombre de Reynolds dépasse 200 000 ce coefficient peut être retouché.

Autres :

Si l'on dispose de mesures de la traînée "T" pour différentes vitesses "V" il est possible de trouver les valeurs de K de l'élément.

$$K = \frac{\sum (T_i / V_i)}{\sum V_i}$$

Dans le cas contraire, il faut décomposer l'élément en plusieurs parties de géométrie simple pour lesquelles il est possible de trouver la traînée pour 1 m/s. la somme de ces traînées partielles donne une idée des traînées sur l'élément. Elles seront fournies au programme.

ELEMENTS INSENSIBLES A L'INCLINAISON DE LA LIGNE DE MOUILLAGE:

Leur traînée est indépendante de l'inclinaison de la ligne de mouillage. C'est le cas, par exemple des courantomètres Aanderaa, tant que l'angle d'inclinaison de la ligne est inférieur à 27 degrés.

S'il s'agit d'un cylindre, seul le coefficient de traînée normale "Cn" intervient. Il est déterminé, comme dans le cas précédent. Pour que Vn et Vt aient le même effet il faut que Kn = Kt .

Dans le cas contraire, il nous faut estimer la traînée pour 1 m/s. Pour un courantomètre Aanderaa « RCM4 » ou « RCM5 » le constructeur donne :

V en m/s	0.51	1.03	1.54	2.06	2.57
T en Kg	1.03	2.45	4.98	10.56	20.60

D'où : Kn = Kt = 2.69 N

ELEMENTS SOUPLES

Ce sont les bouts et les câbles ou les chaînes.

Câbles :

Dans ce premier cas, Il faut fournir la flottabilité pour un mètre de longueur et choisir une des trois possibilités suivantes :

1- Lisse tel que le Parafil, les câbles d'acier rilsanisé...
2- Rugueux dont la gaine extérieure est tressée.
3- Très rugueux tels ceux qui sont cordés, à 3 ou 4 torons.

Puis nous proposons 2 coefficients de traînée :

- "Cn", Coefficient de traînée normale à l'axe du câble,
- "Ct", Coefficient de traînée de friction tangente au bout, dont la valeur varie en fonction du choix précédent.

Une fois que le diamètre "d" du câble est fourni, le programme calcule les valeurs de Kn et de Kt pour 1 mètre de longueur ; elles sont :

$$Kn = \frac{1}{2}\rho D Cn \qquad \text{et} \qquad Kt = \frac{1}{2}\rho \pi D Ct$$

où D x 1 m est la section normale à l'axe du segment de 1 m de longueur unité et π D x 1 m est la surface mouillée de 1 m.

Chaînes :

Dans le cas des chaînes, une fois le diamètre fourni, le programme propose comme coefficients de traînée : Cn = 2.75 et Ct = .46

Ensuite, il calcule le poids, puis Kn et Kt pour 1 mètre de longueur en utilisant la même méthode que pour les câbles ou bouts. Les coefficients Cn et Ct ont été estimés en fonction de cette méthode de calcul.

- III - MISE A L'EAU ET RELEVAGE D'UN MOUILLAGE

Les contraintes exercées sur une ligne de mouillage sont les plus fortes lors des opérations de mise à l'eau et de récupération. Elles dépendent non seulement de la constitution de la ligne de mouillage, mais aussi de la méthode choisie pour conduire ces opérations, des possibilités de manœuvre du navire utilisé et de l'état de la mer. Nous allons examiner ces problèmes plus en détail.

- III . 1 - GENERALITE SUR LES MANOEUVRES DE MOUILLAGE

Au début d'un projet de mouillage, il est indispensable de prévoir les méthodes de mise à l'eau et la récupération ainsi que leur déroulement. A bord, ces opérations sont examinées en concertation avec le commandant du navire qui les adaptera en fonction de son expérience et des possibilités de manœuvre de son bâtiment. Une fois sur zone, il décide si ces opérations peuvent avoir lieu en fonction de l'état de la mer.

Par ailleurs, il est nécessaire que l'équipe de scientifiques embarqués connaisse dans le détail la composition de la ligne de mouillage et que les responsabilités soient clairement distribuées. En effet, il faut penser que ce travail se fera dans des conditions inhabituelles et que l'improvisation sera difficile. Les manœuvres de mise à la mer ou de récupérations étant assurées par le bord, il est indispensable que le "*bosco*" soit avisé du déroulement souhaité des opérations.

Le rôle des scientifiques est d'assembler ou de présenter à la demande les différents éléments du mouillage. Souvent, il est nécessaire qu'ils participent aux manœuvres. Pour cela, ils doivent connaître le langage utilisé à la mer afin de n'intervenir qu'à bon escient. Leur "coup de main" est alors apprécié et permet d'établir un meilleur contact avec l'équipage et une ambiance plus agréable à bord.

Nous distinguerons deux méthodes de travail selon que l'ancrage sera mouillé en premier ou qu'il sera largué en dernier.

- III . 2 - ANCRAGE FILE EN PREMIER

(figure 12)

Nous allons voir, dans l'exemple qui suit, le déroulement de ce type de mise à l'eau à partir d'un navire équipé d'un portique arrière mobile.

<u>Préparation</u> :

Une poulie à large engoujure (dite "avale tout") est frappée sur le portique arrière. Le bas de la ligne, maillé sur le corps-mort, passe dans la poulie et vient garnir la poupée du treuil. Derrière ce treuil, tout le reste des éléments souples sont assemblés, dans l'ordre où ils seront mouillés, les uns à la suite des autres. L'ensemble peut être enroulé sur un touret, comme dans

notre exemple, ou posé sur le pont, dans le cas d'un mouillage court ; Tout doit être clair. La flottabilité de tête de ligne est prête à être mouillée. Il est indispensable d'avoir prévu sur la ligne un point qui permette de reprendre la tension sous chaque élément encombrant afin de pouvoir les introduire dans le mouillage. Nous allons voir leur utilité pendant les opérations de mise à l'eau et de récupération.

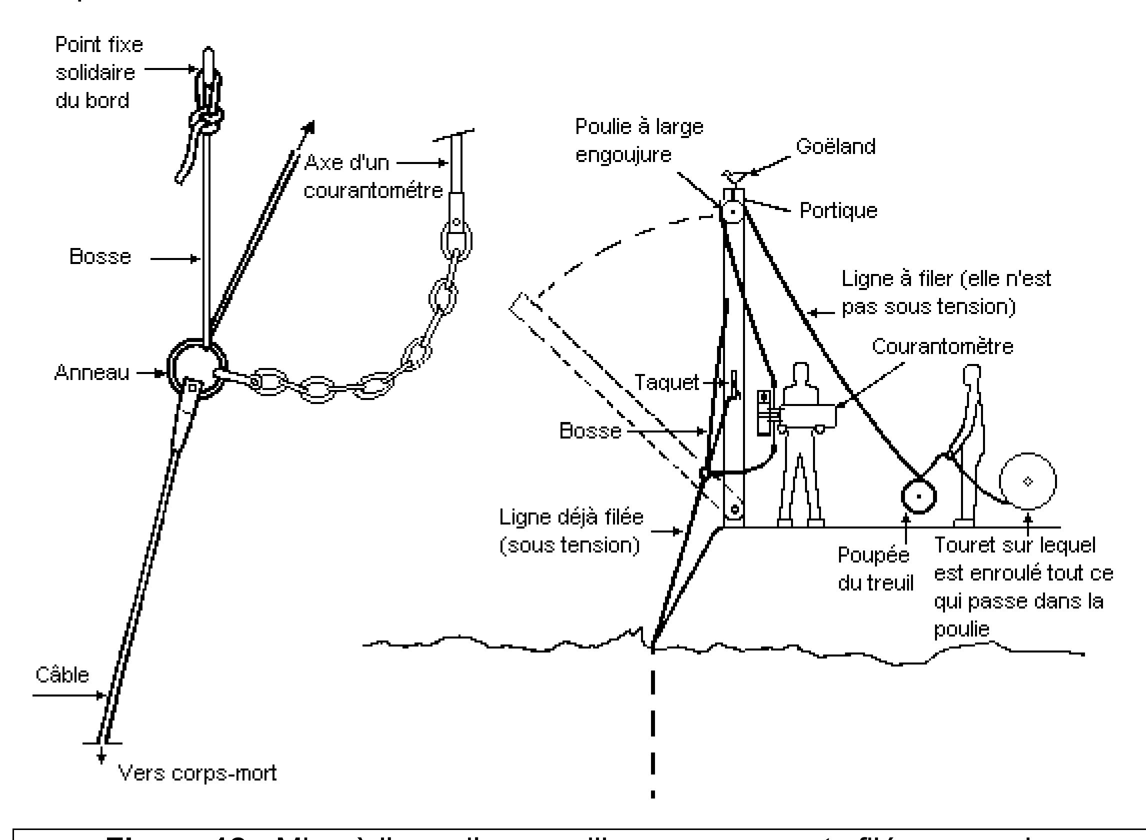


Figure 12 : Mise à l'eau d'un mouillage, corps-morts filé en premier.

<u>Les opérations de mise à l'eau peuvent commencer</u> :

Le treuil *vire* un peu et soulève le corps-mort. Le portique est débordé et le treuil dévire pour filer la ligne... Arrive la liaison entre deux éléments souples où l'on doit introduire un appareil. Une fois que cette liaison a passé la poulie, le treuil est stoppé, le portique rentré. Au niveau de cette liaison, ou mieux, environ un mètre plus bas, un point pour reprendre la tension a été prévu. Ce peut être un anneau, quelques mailles de chaîne ou un simple trou supplémentaire dans un *linguet*. Dans notre exemple il s'agit d'un anneau suivi d'une *estrope*. Souvent l'estrope est remplacée par un bout de chaîne. Une bosse passée dans cet anneau est frappée sur un taquet ou sur un autre point fixe solidaire du bord. Le treuil dévire jusqu'à ce que la bosse reprenne la tension. La liaison est ouverte et l'appareil introduit (voir figure 12). Lorsqu'il est fixé à la ligne en haut et en bas, le treuil vire un peu pour reprendre la tension ; la bosse est larguée, le filage de la ligne se poursuit jusqu'à la liaison suivante et ainsi de suite jusqu'à la tête de la ligne (normalement une flottabilité) qui est mise au-dessus de la surface, puis larguée. Le mouillage est terminé.

Généralement, pour aider les éléments constituant les liaisons à passer sur la poupée du treuil et dans la poulie, mais aussi pour ne pas endommager le câble enroulé sur le touret, ces éléments sont enveloppés dans un chiffon.

Si le dernier élément est une bouée de surface, il faut le placer rapidement en bout de ligne et tout larguer au plus vite afin de traîner le corps-mort sur le fond où il risque de s'engager et de provoquer une rupture dans la ligne de mouillage.

Il est utile de fixer sur cette flottabilité un bout, de préférence flottant (par exemple du polypropylène), pouvant passer à travers plusieurs petits flotteurs, et se terminer par un autre petit flotteur. Ceci constitue une "queue". Sa présence facilitera la récupération du mouillage en crochant dans cette "queue" à l'aide d'une gaffe ou d'une chatte, mais attention à ce qu'elle ne vienne pas s'engager dans l'hélice !

Ces opérations de mise à l'eau se font aussi bien à partir d'un portique arrière qu'avec une grue ou un mât de charge.

Variantes : Afin de ne pas travailler sous forte tension lors des opérations de mise à l'eau de la ligne de mouillage, il est possible de faire porter le corps-mort par une bouée auxiliaire de flottabilité appropriée (figure 13). Lorsque la ligne est larguée du navire, la flottabilité auxiliaire est séparée du corps-mort (par l'intermédiaire d'un largueur) et le mouillage se met en place. Il ne reste plus qu'à récupérer la bouée et le système de largage qui sont en dérive. Les opérations de mise à l'eau et de relevage s'apparentent alors au cas ou l'ancrage largué en dernier, vu ci-après ; cependant il faut avoir prévu sur la ligne des points pour reprendre la tension, non seulement en dessous, mais aussi au-dessus de chaque appareil.

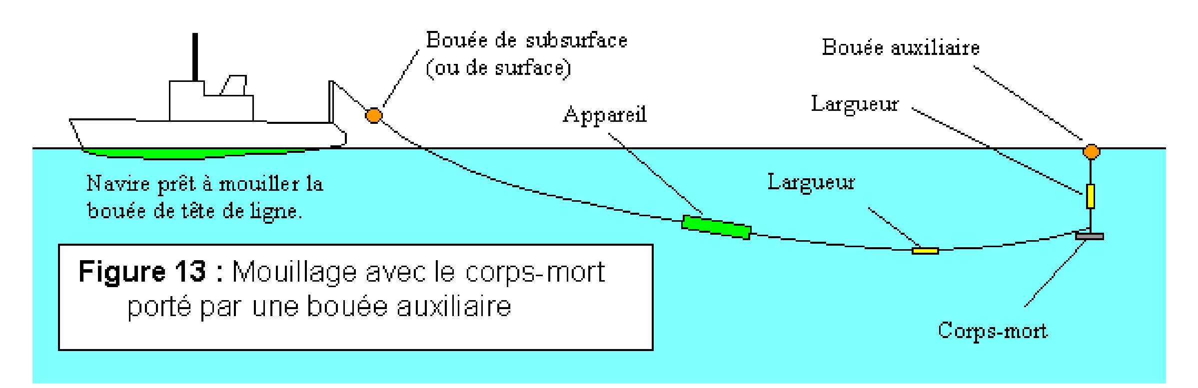


Figure 13 : Mouillage avec le corps-mort porté par une bouée auxiliaire

Opérations de relevage

Si la ligne de mouillage a été équipée d'un largueur au-dessus de son corps-mort, il faut en télécommander l'ouverture. Le corps-mort est alors abandonné. Comme il n'y a plus de fortes tensions sur la ligne, le mouillage peut être facilement remonté à bord. S'il n'est pas trop long et si les éléments qui le composent ne sont pas trop lourds, il est même possible de le hisser à la main.

Dans le cas contraire, il faut le virer à bord en utilisant le portique (ou un équivalent) et le treuil. Les opérations sont les mêmes qu'à la mise à l'eau mais l'ordre en sera inversé. La présence d'un point permettant de reprendre la tension sous chaque élément rigide est de nouveau indispensable.

Lorsque l'ancrage (corps-mort ou ancre) est relevé, il arrive qu'il soit ensouillé ou engagé, ce qui peut entraîner la rupture de la ligne de mouillage. C'est pourquoi nous conseillons de gréer, volontairement entre le corps mort et l'appareil le plus bas, l'élément le moins résistant de la ligne.

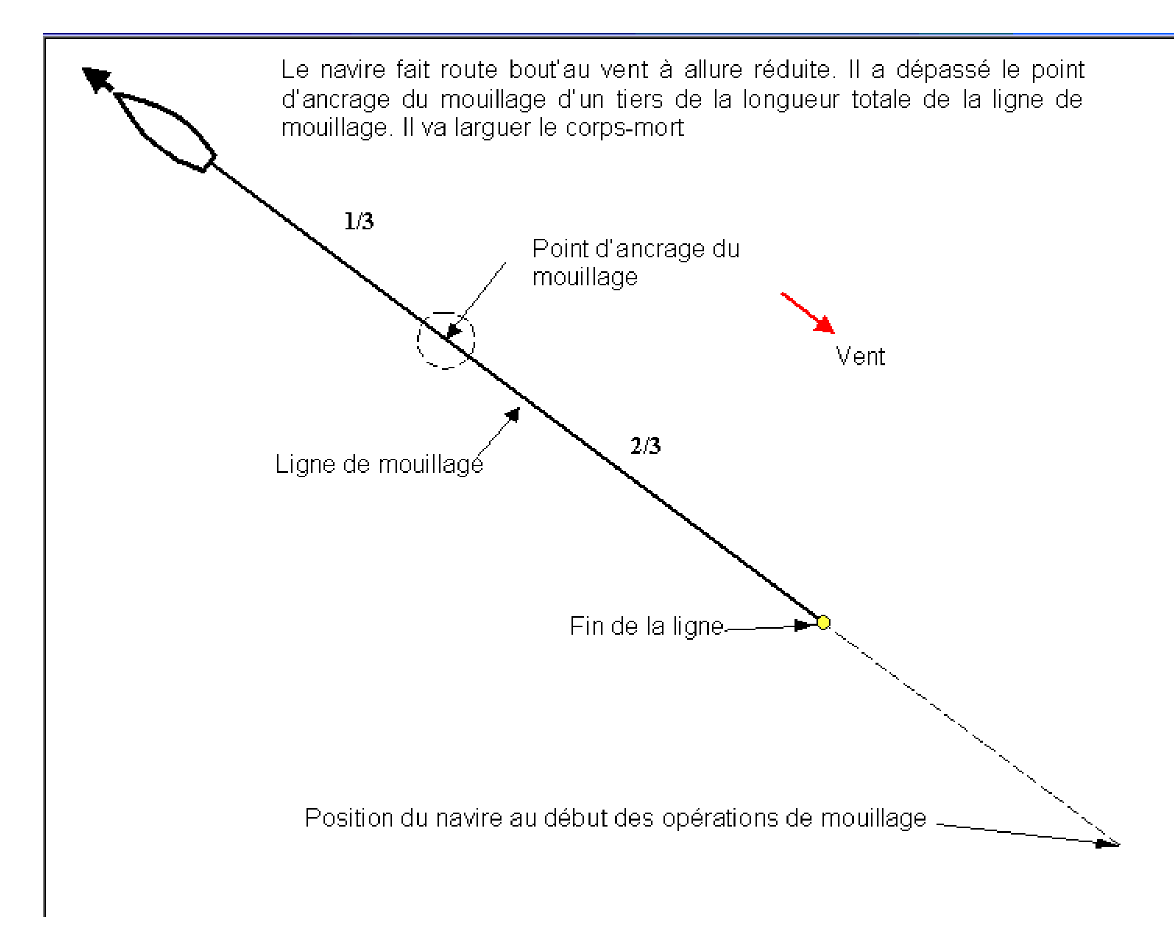


Figure 14 : Mouillage "ancrage en dernier".

- III . 3 - ANCRAGE FILE EN DERNIER

Préparation :

Si la ligne de mouillage est courte, elle est posée entièrement gréée sur le pont, en bitures, claire et prête à être filée. L'extrémité de la ligne est maillée sur le corps-mort. Celui-ci est prêt à être largué.

Si elle est longue, tous les éléments souples sont enroulés dans l'ordre sur tourets de telle sorte qu'elle se déroule depuis la tête du mouillage vers son ancrage.

Mise à l'eau :

Nous avons vu qu'en *mouillant* l'ancrage en premier, nous devons travailler sous tension. Cette méthode nécessite des éléments très résistants et elle présente des dangers pour le matériel et ceux qui le manipulent. Nous lui préférons la seconde technique de mouillage où la bouée est mise à l'eau en premier. Dans ce cas, pendant les opérations de mouillage, le navire fait route en avant très lentement (environ 2 nœuds) bout'au vent. Le mouillage commence lorsqu'il est à une distance d'environ à 1.5 fois la longueur de la ligne[1]. La flottabilité en tête du mouillage est mise à l'eau et la ligne est filée, moins vite que le bateau n'avance pour maintenir une bonne tension. Le corps-mort est largué lorsqu'elle est entièrement étendue et que le bateau a dépassé le point de mouillage d'un tiers de la longueur de la ligne. C'est alors que les efforts dans la ligne sont maximums, mais comme ils restent nettement moins importants que dans le cas précédent aussi le diamètre des câbles peut être réduit. La tension dans la ligne reste inférieure au poids du corps-mort dans l'eau :

T < g (m - ### Vo)

Avec : g accélération de la pesanteur, m masse du corps-mort, ### masse volumique du corps-mort, Vo volume du corps-mort.

La bouée en tête du mouillage revient vers le navire à une vitesse importante. Il peut même se produire qu'une bouée de surface se mette à plonger !

Si le navire a gardé un cap constant pendant le filage de la ligne, le corps-mort se pose sur le fond à environ un tiers de la longueur de la ligne filée à l'arrière du point de largage (dans le cas des mouillages de sub-surfaces). Il sera, par contre, indispensable d'utiliser un *largueur* afin de récupérer la ligne de mouillage, en abandonnant le corps-mort au fond.

Il est important de conserver le bateau en route à une vitesse qui permet de conserver une tension sur la ligne pendant tout le filage afin d'éviter que le mouillage ne s'emmêle, surtout lorsqu'il comporte des courantomètres avec dérive. Les câbles ont une fâcheuse tendance à capeler autour de ces appareils et leur dérive dès qu'on leur en laisse la liberté. Si la tension se relâche des coques se formeront dans les câbles en acier toronné.

Il ne faut absolument pas retenir le flotteur de tête de ligne au bord à l'aide d'un bout, mais tout laisser s'allonger au mieux derrière le bateau ; sans quoi tout s'emmêle !

---

[1] C'est le commandant du navire qui choisit cette distance en fonction de la vitesse du navire qui doit rester manœuvrant et de la durée estimée des opérations de mouillage.

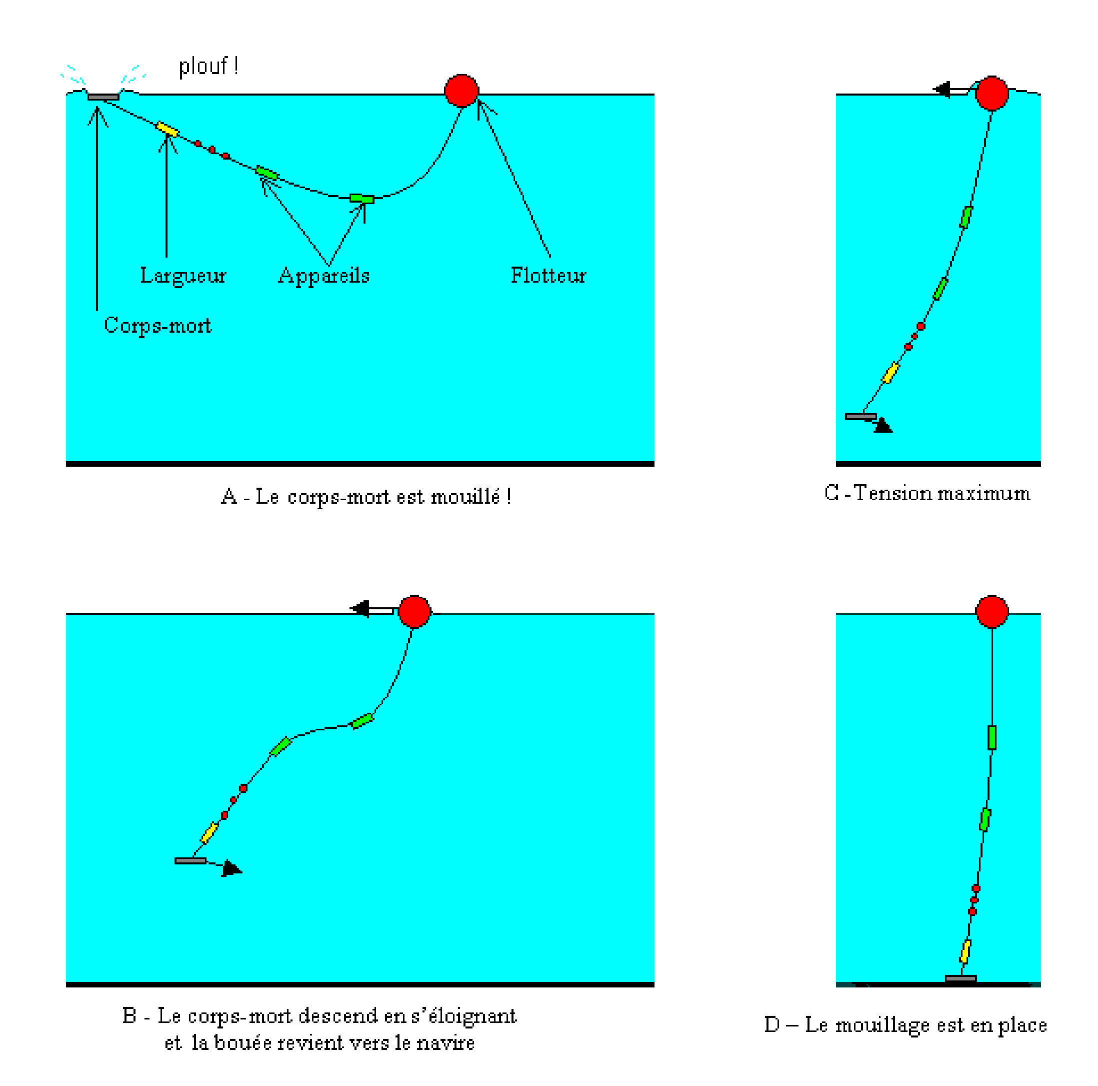


Figure 15 : Mouillage avec ancrage mis à l'eau en dernier

- III . 4 - ESTIMATION DES CONTRAINTES MAXIMALES

(lors de la mise à l'eau ou du relevage)

C'est au moment de la mise à l'eau et du relevage d'un mouillage que les contraintes sont maximales. Leur estimation, quoique complexe, est donc prédominante pour vérifier si l'échantillonnage des différents éléments est correct. Nous allons voir comment aborder ce problème.

Lorsqu'un objet immergé reste lié à un navire par un câble, les mouvements de ce navire provoquent sur cet objet des variations de vitesse et d'accélérations qui se traduisent par des fluctuations de la tension dans le câble. Ce qui peut s'écrire sous la forme :

$$Mv\frac{d^2z}{dt^2}+ES\frac{z}{L}+F\left(\frac{dz}{dt}\right)^2-p=0$$

avec : Mv masse virtuelle de l'objet $Mv = M + Ma$

M masse de l'objet (au cas échéant rempli d'eau),

Ma masse ajoutée : Ma = kr ### Vol, (Kr est le coefficient de masse ajoutée).

E module d'élasticité longitudinal (module de Young),

S section du câble

L longueur du câble.

F force de traînée pour une vitesse de 1 m/s F = 1/2 ### C S

où ### est la masse volumique de l'eau de mer en kg/m^3,

C le coefficient de traînée de l'objet,

S sa section normale au déplacement.

p poids dans l'eau p = g (m - ### Vo)

où g est l'accélération de la pesanteur,

m la masse de l'objet,

la masse volumique de l'eau de mer,

Vo le volume de l'objet,

z est la coordonnée verticale.

Lorsqu'un corps se déplace dans un fluide, il a tendance à entraîner une partie de ce fluide ; par conséquent, lorsqu'il est soumis à des accélérations, celles-ci s'appliquent non seulement à la masse de ce corps "m", mais aussi à une certaine masse "m_a" du fluide. Cette masse "m_a" est appelée "masse ajoutée". Elle dépend de la masse volumique du fluide, du volume du corps et de sa forme. Le coefficient "kr" permet d'ajuster la masse ajoutée en fonction de sa forme. Il est, par exemple, de 0.5 pour une sphère.

Imaginons le câble vertical retenant un objet immergé dans l'eau ; En première approximation considérons qu'il est soumis à un mouvement sinusoïdal tel que :

$$v = Vo + V \sin(\omega t)$$

L'objet subit une accélération :

$$dv/dt = \omega V \cos(\omega t)$$

Remarquons que la vitesse est maximale lorsque l'accélération est nulle, donc la force de traînée sera maximum lorsque la force d'inertie sera nulle, et inversement.

Il peut arriver que la vitesse de descente du câble soit supérieure à celle de l'objet. Dans ce cas, il y a du mou dans le câble. L'objet tombe alors librement. Au moment où le câble se trouve de nouveau tendu, il subit une surtension qui peut provoquer sa rupture.

- IV - DIFFERENTS TYPES DE MOUILLAGE

- IV . 1 - MOUILLAGES SOLIDAIRES DU FOND

- IV . 1 . 1 - Avec flottabilité de surface

Ce type de mouillage n'est intéressant que par petits fonds, par exemple sur le plateau continental. Il est difficile à mettre en œuvre par grands fonds et dans ce cas, l'évitage devient si important qu'il est impossible d'obtenir des mesures de courant crédibles.

- IV . 1 . 1 . 1 - Mesures à proximité de la surface

Pour réaliser des mesures à proximité de la surface, il est possible d'utiliser une ligne de mouillage principale ayant une bouée de surface à laquelle est fixé un système flottant. Suivant les cas ce sera un *cabrion*, une bouée satellite ou une *ligne semi-rigide* et les appareils seront installés sous ce système. Leur but est d'éloigner les appareils de la ligne de mouillage principal afin d'éviter que l'ensemble s'emmêle.

De manière générale, la longueur de la ligne principale peut être de 1.5 à 3 fois la profondeur d'eau (à pleine mer). On peut décomposer cette ligne en trois parties : La "ligne flottante", la "chaîne de marnage" et la "chaîne dormante" (figure 16).

La "ligne flottante" est amarrée à l'extrémité inférieure de la bouée par un émerillon à billes qui évite à la ligne de prendre un tour à chaque cycle de marée. Si le fond est important, elle est constituée par un câble en textile. Une chaîne ou, plus rarement et nous le déconseillons, un câble d'acier peut être utilisé en eau peu profonde. Cet élément de ligne fatigue relativement peu, mais son échantillonnage doit être suffisant pour résister aux mouvements de rappel de la bouée.

La "chaîne de marnage" est soumise à un ragage important sur le fond. Par son poids, elle joue un rôle d'amortisseur. Elle devra donc être surdimensionnée, mais il n'est pas utile qu'elle soit galvanisée. La limite entre la "chaîne de marnage" et la "chaîne dormante" n'est pas nette, aussi sont-elles souvent confondues sous le nom plus général de "chaîne de mouillage".

Pour cette dernière partie on utilise de la chaîne très lourde. Il peut être intéressant qu'elle soit galvanisée si elle est récupérée pour d'autres utilisations. Par son poids, la "chaîne dormante" participe à la tenue du mouillage sur le fond. Elle est maillée sur une ancre ou sur un corps-mort.

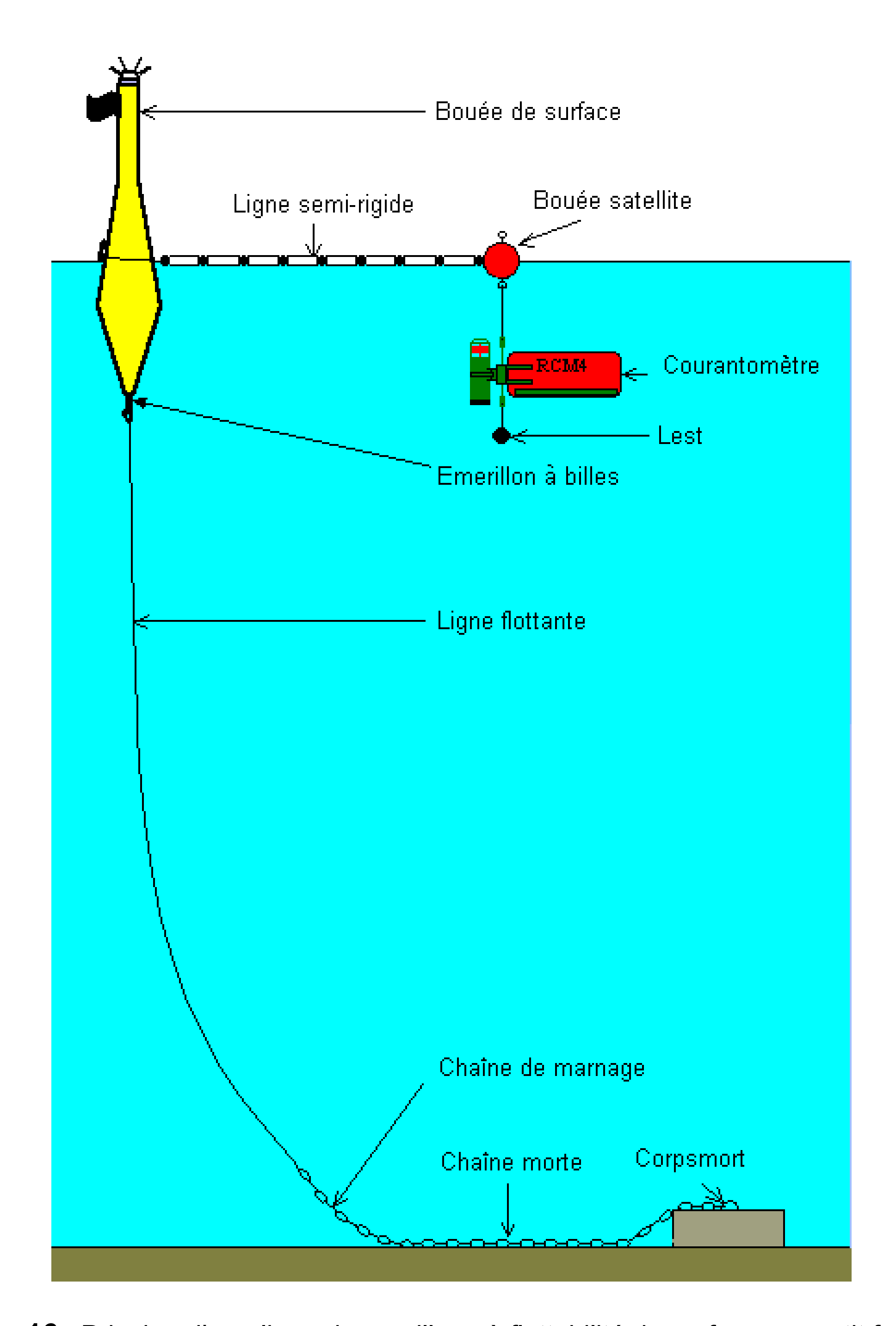


Figure 16 : Principe d’une ligne de mouillage à flottabilité de surface par petit fond.

Afin de diminuer l'évitage, la ligne de mouillage doit être la plus courte possible. Dans ce cas, la chaîne de marnage est directement frappée sur le corps-mort.

Pour empêcher le dérapage du corps-mort, on assure souvent celui-ci en le reliant, par l'intermédiaire de quelques mètres de chaîne, à une ancre (Brittany ou Fob de 10 à 15 kg par exemple).

Le ou les flotteurs satellites sous lesquels sont installés les appareils de mesure, sont maintenus écartés de la bouée principale à l'aide d'un cabrion ou d'une ligne semi-rigide. A l'origine, le cabrion était une lourde poutre de bois . Mu par la houle, il se comportait comme un bélier vis-à-vis de la bouée de surface. C'est la raison pour laquelle nous lui préférons un système plus léger, réalisé à partir d'un tube de P.V.C., renforcé à ses extrémités par des manchons en bois. Un système encore plus léger et plus souple peut être conçu en utilisant une ligne semi-rigide. Elle est constituée de flotteurs séparés par des disques de caoutchouc qui sont enfilés sur un câble et maintenus compressés. La tension dans le câble doit limiter la courbure de la ligne semi-rigide afin d’éviter que les appareils ne s'emmêlent autour de la ligne flottante (figure 16).

<u>Avantages</u> :

- Ce système permet de réaliser des mouillages très près de la surface.
- On peut procéder à des vérifications ou à des changements d'appareils sans avoir à relever le mouillage principal.
- Si le lest sous les appareils est important, leur inclinaison est faible.
- Il est possible d'utiliser un mouillage déjà en place pour y fixer un système satellite sous lequel seront installés des appareils de mesure.

<u>Inconvénients</u> :

- La liaison entre la bouée principale et le système flottant satellite est très vulnérable (rupture due à l'usure, au vol, aux chocs avec un navire...).
- La durée des mesures obtenues à partir de ce type de mouillage sera donc limitée.
- Les mouvements du système flottant se répercutent sur les appareils de mesure et les enregistrements sont d'autant plus bruités que la mer est forte.
- L'évitage est important. Il peut perturber les mesures, surtout dans le cas de mesures des courants.

- IV . 1 . 1 . 2 - Mesures le long de la verticale

Il est difficile d'obtenir de bonnes mesures à partir d'appareils placés le long de la ligne flottante. Aux erreurs dues aux mouvements d'évitage et de pilonnement de la bouée de surface viennent s'ajouter celles provoquées par les variations d'immersion et d'inclinaison des appareils. Afin de minimiser ces dernières, on réduit la longueur de la ligne de mouillage. Mais on atteint vite des limites dues au marnage, à la résistance de la ligne, à la tenue de l'ancrage sur le fond ou à la flottabilité de la bouée de surface. Un compromis est difficile à trouver ; il est rarement satisfaisant.

Cependant, dans le cas où il ne serait pas possible d'utiliser un autre type de mouillage, nous recommandons de placer un lest important en bas de la ligne flottante. Ce lest réduira l'inclinaison de la ligne flottante. Il peut être constitué de gueuses ou plus simplement d'une très lourde chaîne.

Avantages :

- Ce type de mouillage permet d'obtenir des mesures depuis la surface jusqu'à proximité du fond.
- La bouée de surface est un moyen très efficace pour écarter du mouillage les chalutiers et autres navires en pêche.

Inconvénients :

- A cause du mouvement des éléments en surfaces, les tensions exercées sur le mouillage sont importantes d'où une fatigue et une usure des éléments. Il faut donc sur échantillonner l'ensemble du mouillage
- Comme nous l'avons indiqué précédemment, les mesures obtenues sont bruitées, surtout celles des courants. L'inclinaison de la ligne flottante peut poser des problèmes. La tenue du mouillage est plus difficile à assurer.

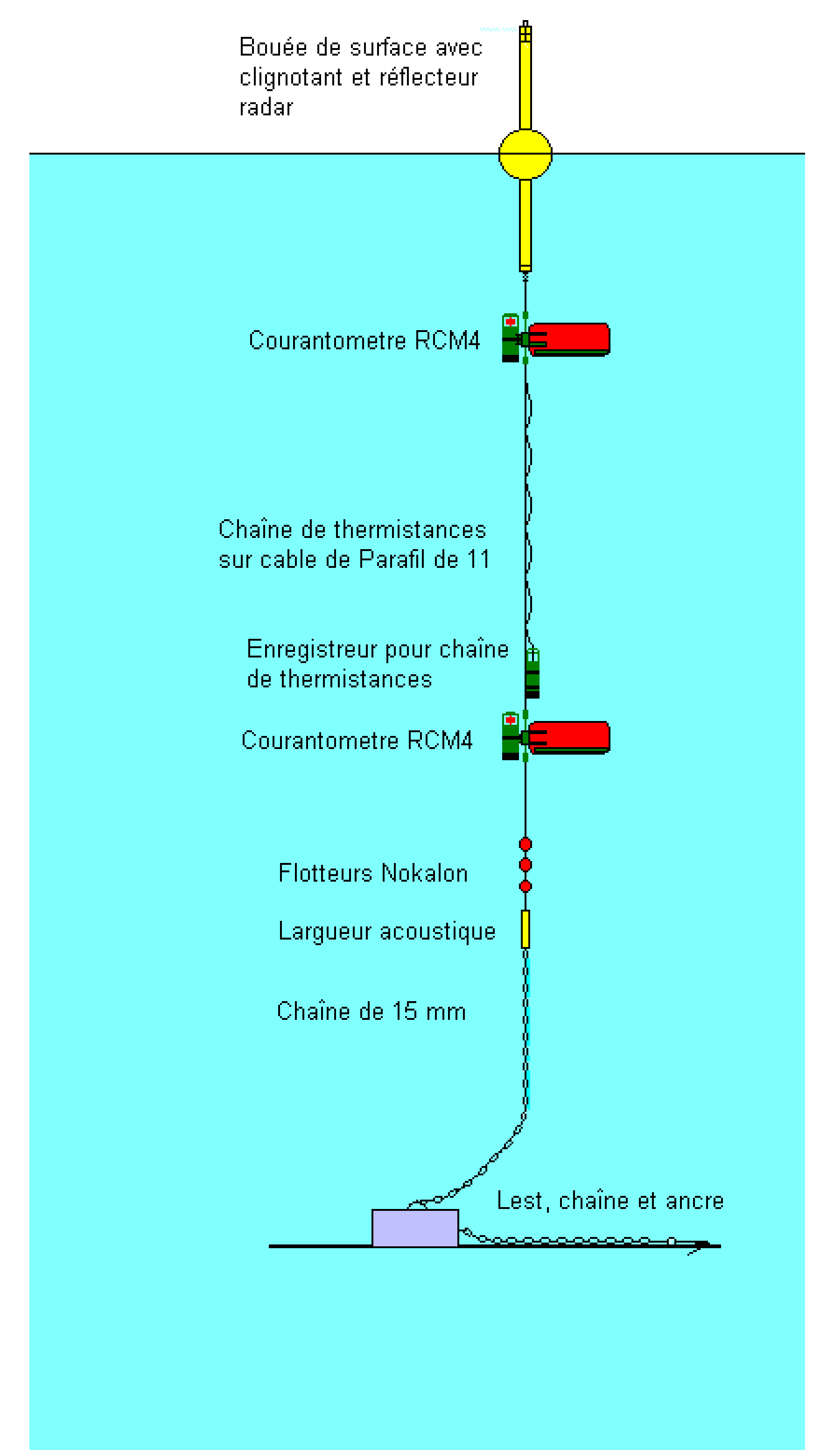


Figure 17 : Mouillage pour mesures sur la verticale utilisé pendant ENVAT 81

- IV . 1 . 1 . 3 - Mesures près du fond

- Il est possible de poser des appareils de mesure sur le fond. Lorsqu'il s'agit de courantomètres classiques, ceux-ci sont placés dans un bâti.
- Dans l'exemple de la figure 18 l'appareil est un courantomètre à 5 rotors qui est suspendu dans un portique. La bouée de surface joue le rôle de bouée de marquage et sa flottabilité n'a que peu d'importance. Elle est reliée au portique par un câble en textile dont longueur avoisine une fois et demie la hauteur d'eau. Si la densité de le câble est supérieure à celle de l'eau, un petit flotteur de subsurface évitera à la ligne de mouillage de s'enrouler autour du portique par faible courant.

Recommandations :

- Le portique devra être suffisamment lesté et sa base assez large pour que la tension exercée par la ligne de mouillage ne le fasse pas basculer.
- Lorsque l'on mesure la direction du courant, le portique doit être réalisé en matériau amagnétique, afin d'éviter une déviation du compas de l'appareil.
- A la mise à l'eau, dès que la base touche le fond, il ne doit plus y avoir de tension sur la ligne de mouillage. Il faut donc filer le reste de la ligne et larguer la bouée de surface au plus vite afin de ne pas renverser le portique sur le fond.
- Dans les zones à très forts courants, il est possible de remplacer la bouée de surface par un flotteur profilé. Il nous est arrivé d'utiliser un catamaran léger (engin de plage dégarni de son gréement).

- Avantages :

- Les mouvements de la ligne de mouillage n'ont pas d'influence sur l'appareil de mesure.
- La ligne est constituée d'éléments courants et bons marchés.

- Inconvénients :

- Lorsque ce type de mouillage est utilisé dans une zone à forts courants ou forts transports sédimentaires, le portique risque de s'ensouiller, ce qui peut compromettre son relevage.
- Comme les charges à manœuvrer sont importantes et que le portique présente une forte "prise à l'eau", il faut choisir un câble très résistant et donc de fort diamètre (pour cet usage, nous déconseillons fortement l'usage de câbles d'acier). La traînée sur la ligne sera donc importante, et ce d'autant plus qu'elle sera longue. Il faudra en tenir compte pour choisir la flottabilité de surface et ajuster le poids du portique dans l'eau afin qu'il ne se renverse pas.

- Le portique peut perturber l'écoulement et donc induire des erreurs sur la mesure du courant.

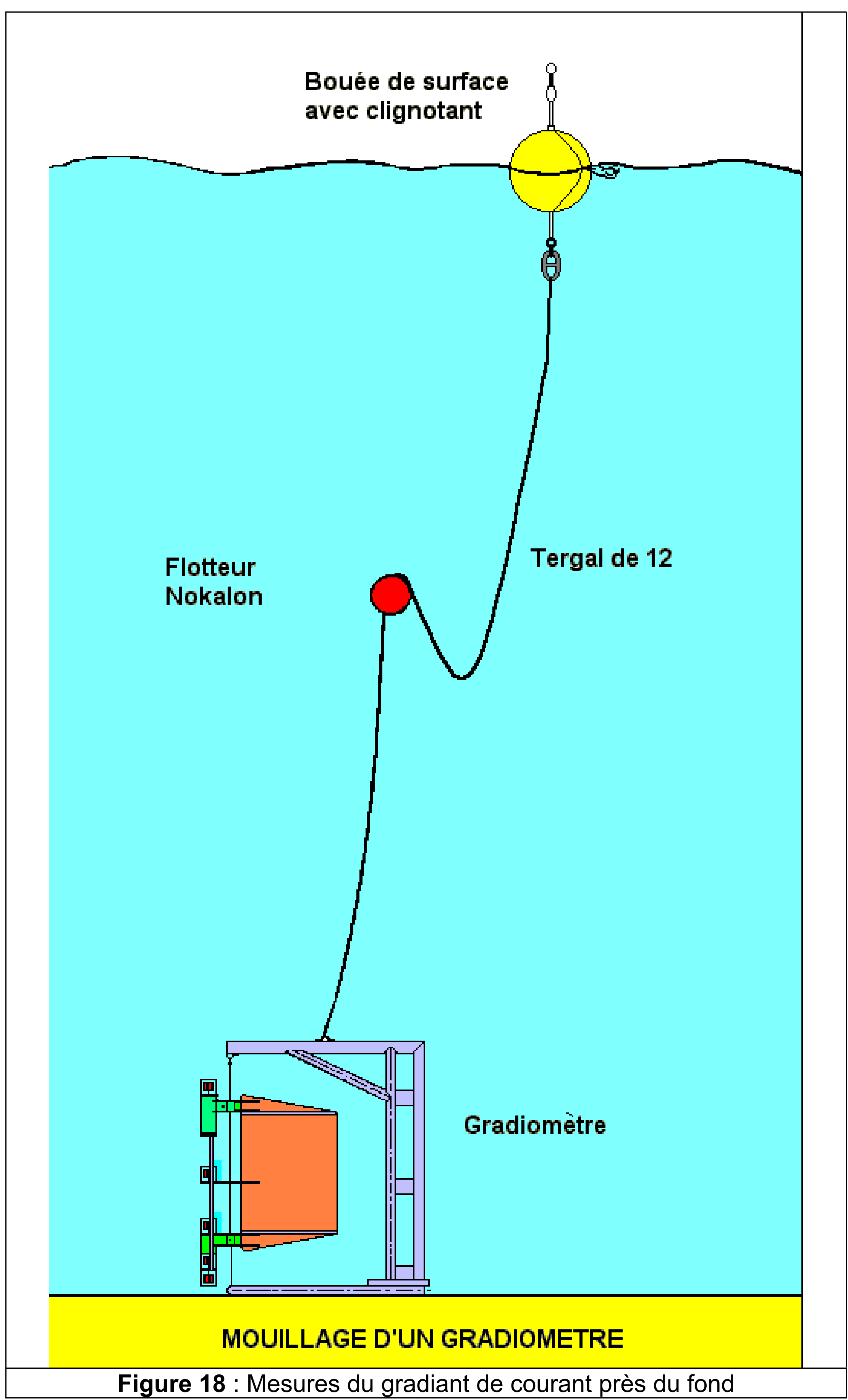


Figure 18 : Mesures du gradiant de courant près du fond

- IV . 1 . 2 - Mouillages avec flottabilité de sub-surface

- IV . 1 . 2 . 1 - Mesures le long de la verticale

Généralement ces mouillages sont composés, de bas en haut, d'un ancrage, de quelques mètres de chaîne, d'un largueur acoustique, d'une ligne instrumentée et d'une flottabilité de subsurface. L'intérêt de ce type de mouillage n'est d'être pas (ou peu) sensible à la houle. La bouée de subsurface est éventuellement équipée d'une balise de positionnement Argos (Watch Dog), d'une balise gonio, d'un flash (ces appareils ne fonctionnent qu'en surface car ils sont équipés d'interrupteurs commandés par la pression), d'une queue, d'un pavillon et d'un réflecteur radar. Avantages :

- Ce type de mouillage est à l'abri des risques de collision liés à la navigation de surface.
- Les problèmes dus aux mouvements de la surface (bruit sur les mesures, usure, ragage, et surtensions sur la ligne) sont pratiquement éliminés.

Inconvénients :

- L'absence de bouée de marquage en surface peut augmenter les risques de perte liés à la pêche et nécessite un positionnement précis au moment de la mise à l'eau... et de la récupération.
- Cette récupération dépend du bon fonctionnement du largueur acoustique. Pour plus de sécurité il est possible de monter en parallèle deux de ces appareils.

- IV . 1 . 2 . 2 - Mesures près du fond

Des mesures de courant à proximité du fond sont obtenues à l'aide de courantomètres classiques ou de courantomètres à effet Doppler.

Dans le premier cas, la conception de la ligne de mouillage est identique à celle utilisée pour les mesures le long de la verticale, mais sa longueur est réduite.

Dans le cas de courantomètres à effet Doppler, l'appareil est placé dans un bâti au-dessus d'une base lestée. L'ensemble est posé sur le fond. Lorsque les mesures sont terminées, un système de largage par télécommande acoustique permet de séparer le bâti du lest. Celui-ci est abandonné sur le fond alors que le bâti qui possède une flottabilité, remonte en surface. Cette flottabilité peut être soit incorporée dans le bâti, soit répartie le long d'une ligne verticale. Dans les zones de pêche, comme ce type de courantomètres est très cher, il est intéressant de réaliser des bâtis sur lesquels les chaluts passent sans endommager ou relever l'appareil.

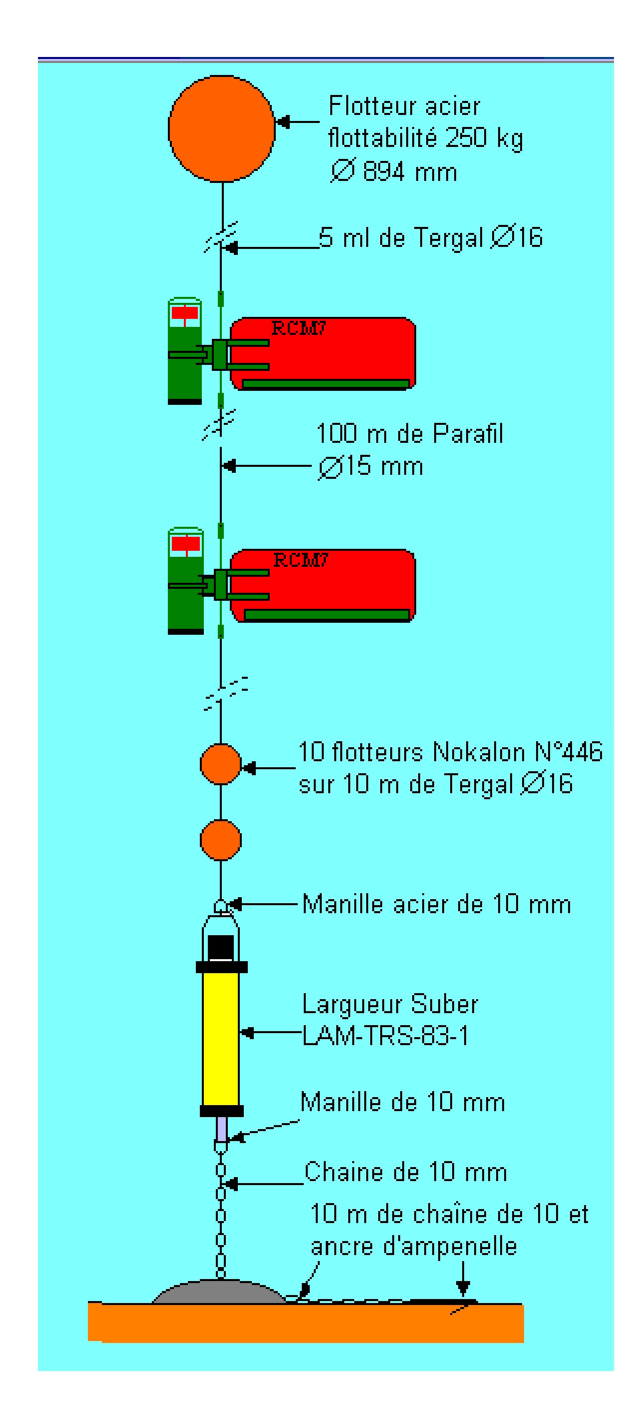


Figure 19 : MOUILLAGE SUB-SURFACE TRANSPLAT 1983

Ce type de mouillage peut être aussi utilisé pour poser des marégraphes sur fond comme dans le cas de la figure 22.

Le marégraphe est couplé à un largueur acoustique à l'aide de deux "colliers doubles". Le collier inférieur reçoit un piétement tubulaire conçu pour maintenir le croc du largueur à environ 10 cm du sol. L'ensemble ainsi constitué, que nous appelons châssis, est posé sur une dalle de béton armé au centre de laquelle se trouve un organeau. Celui-ci est relié au largueur à l'aide d'une manille inox. Ensuite, on raidit deux bouts passés dans des pontets soudés sur les tubes jusqu'à ce que le châssis soit fermement plaqué sur la dalle. L'ensemble dalle châssis est alors

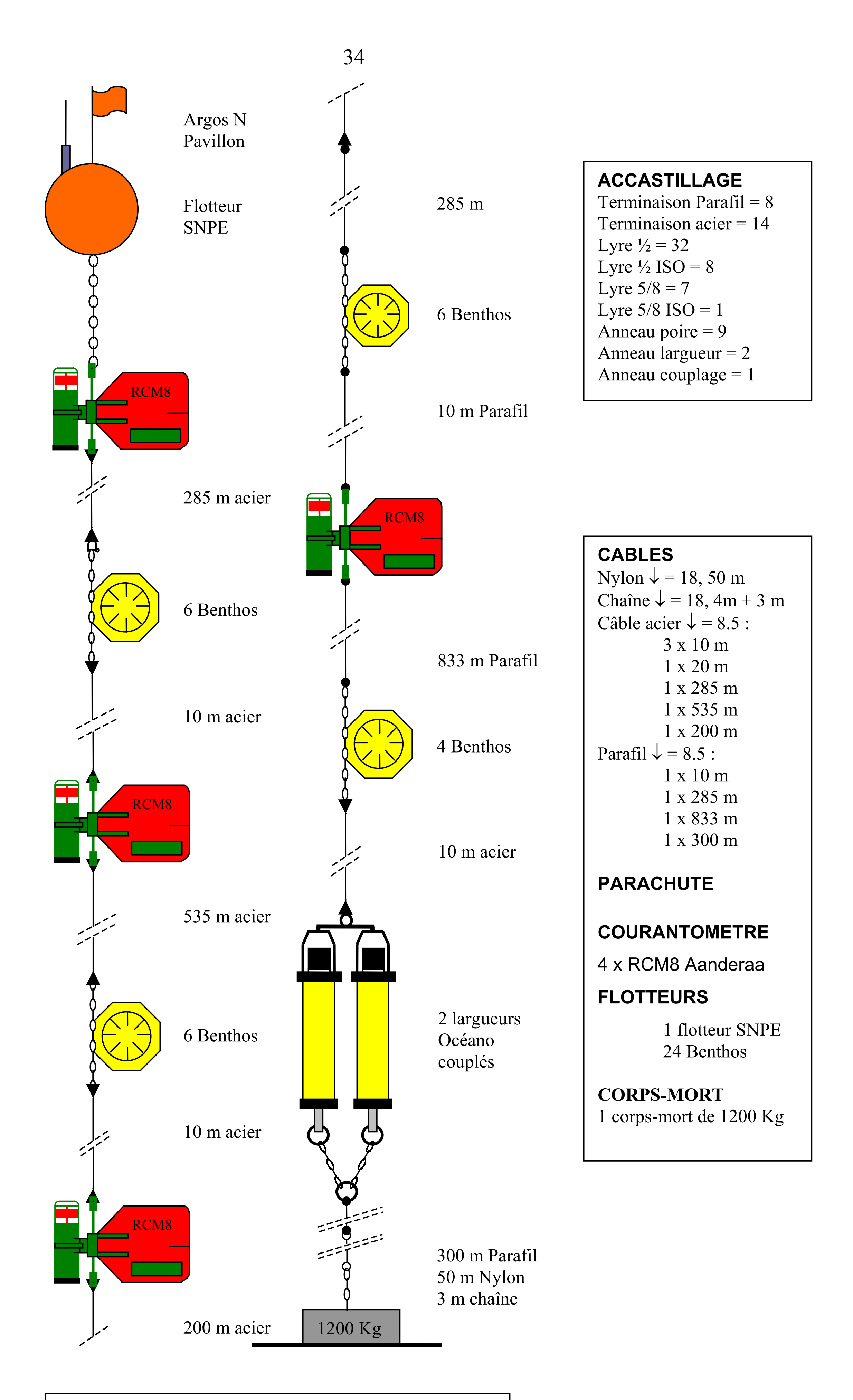


Figure 20 : Mouillage Arcane « LPO sud »

parfaitement rigide. Au-dessus du largueur, les flotteurs qui permettent au châssis de remonter en surface, sont répartis le long d'un câble.

Avantages et inconvénients :

- Ce sont les mêmes que précédemment.

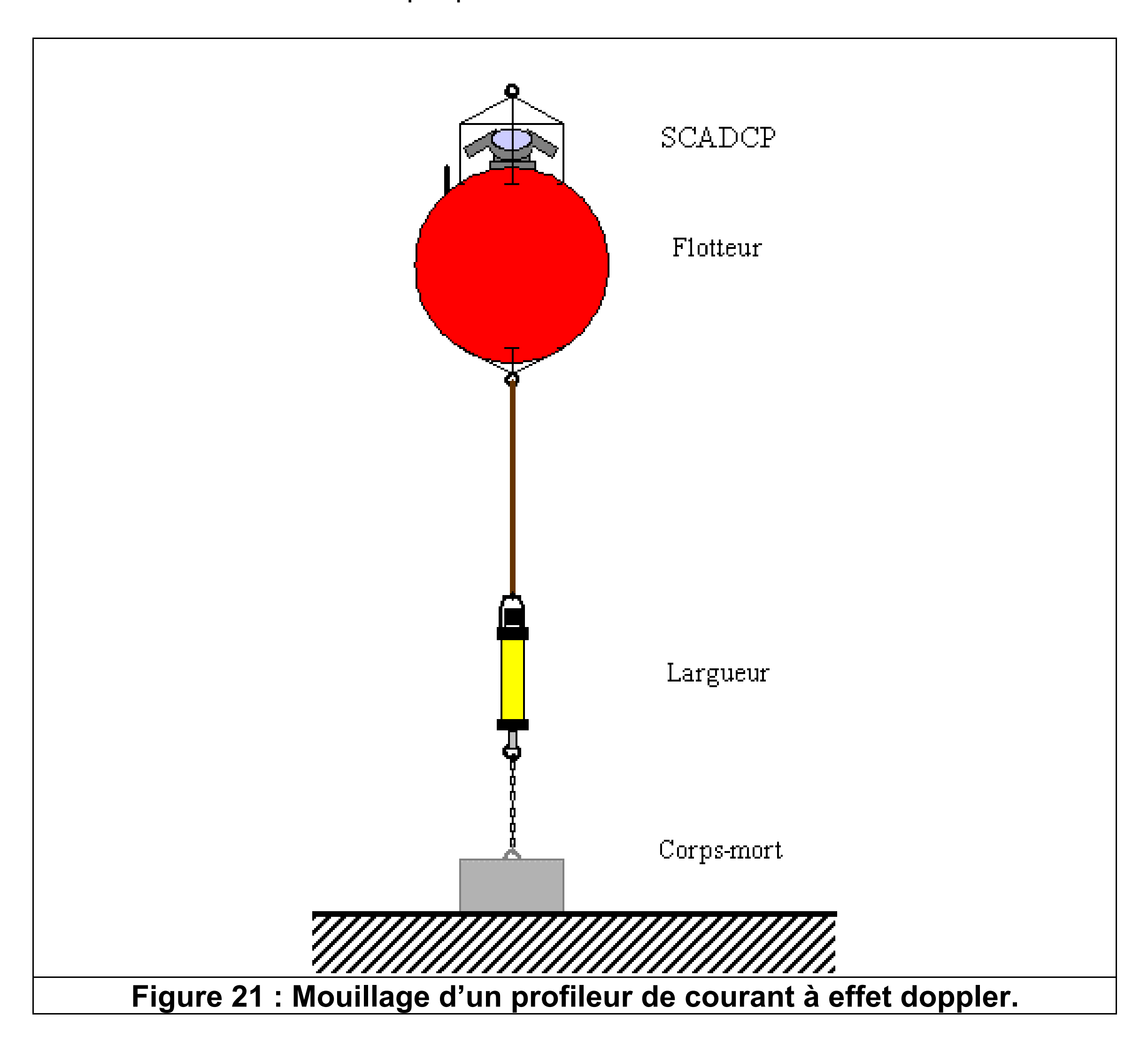


Figure 21 : Mouillage d'un profileur de courant à effet doppler.

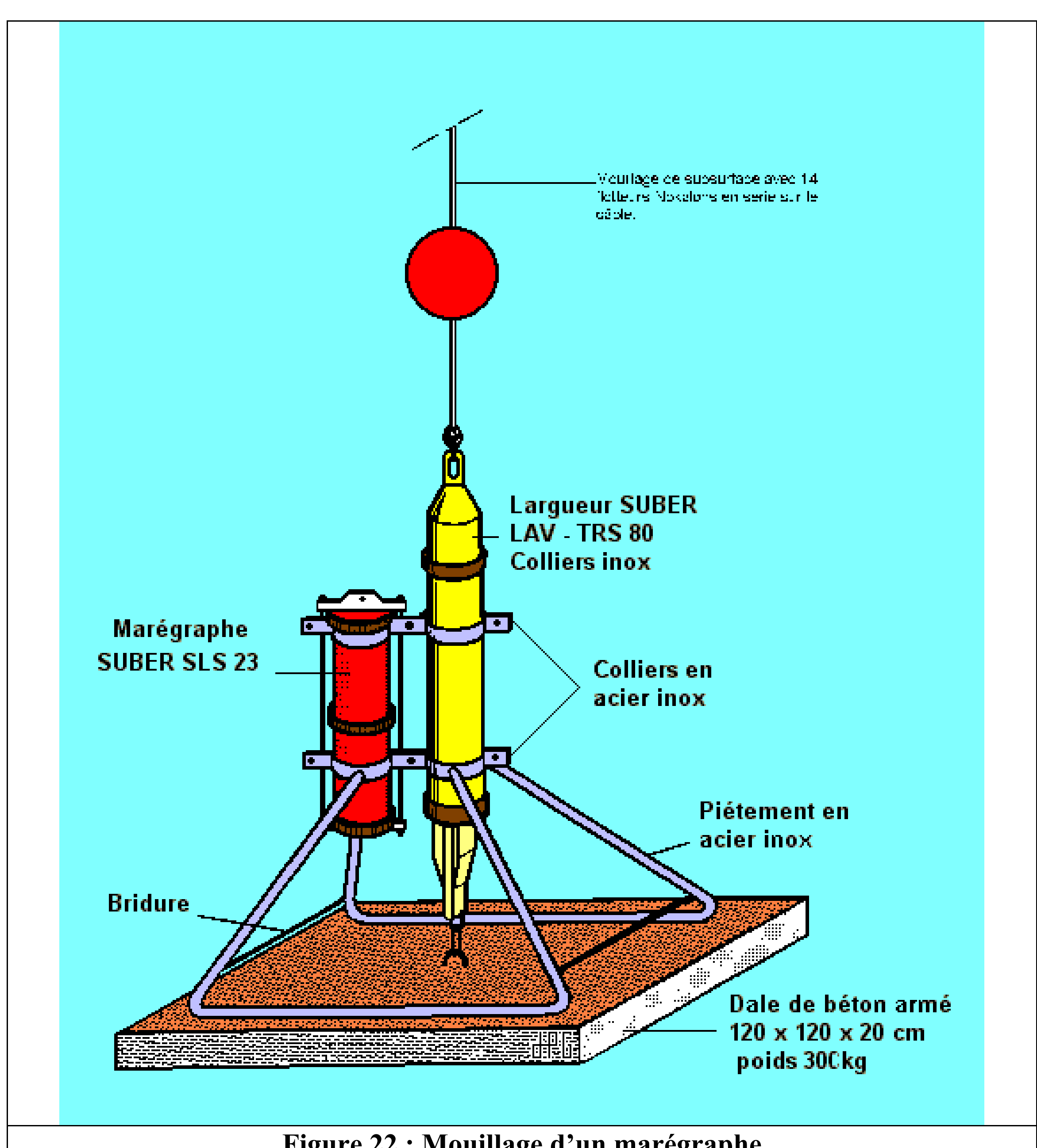


Figure 22 : Mouillage d’un marégraphe

- IV . 1 . 3 - Mouillages complexes

On peut imaginer des lignes de mouillage de plus ou moins grandes complexités afin de les adapter aux différents problèmes posés, aussi est-il impossible d'en faire une étude exhaustive. Nous ne nous intéresserons qu'à trois types de mouillages souvent rencontrés.

- IV . 1 . 3 . 1 - Faible flottabilité de surface et forte flottabilité de subsurface

Cela revient à réaliser un mouillage de subsurface sans largueur au-dessus duquel on place une faible flottabilité de surface. Les mouvements de cette dernière n'auront que peu d'influence sur le reste de la ligne de mouillage mais elle permettra de le localiser et de le relever.

Avantages :

- Conception économique.
- Marquage de l'emplacement du mouillage en surface.

Inconvénient :

Difficile à relever et risque de perte du mouillage dans le cas ou la bouée de surface disparaît (Vol, abordage, câble coupé...).

- IV . 1 . 3 . 2 - Mouillage en "U"

On commence par réaliser un mouillage de subsurface classique mais sans largueur ; à partir de son corps-mort un câble ou une chaîne, allongée sur le fond, rejoint un autre point d'ancrage (ancre ou deuxième corps-mort). Au-dessus de celui-ci, une ligne, pouvant être instrumentée, se termine par une bouée de surface. Il faut veiller à laisser une distance suffisante entre les deux branches verticales du "U" pour qu'elles ne s'emmêlent pas. Le mouillage est récupéré en relevant en premier la bouée de surface.

Avantages :

- Le marquage en surface signale la position du mouillage et il peut donc le protéger des chaluts ou autres engins de pêche.

Inconvénients :

- Ce type de mouillage est difficile à mettre en place et à relever. Il n'est utilisable que par petits fonds.

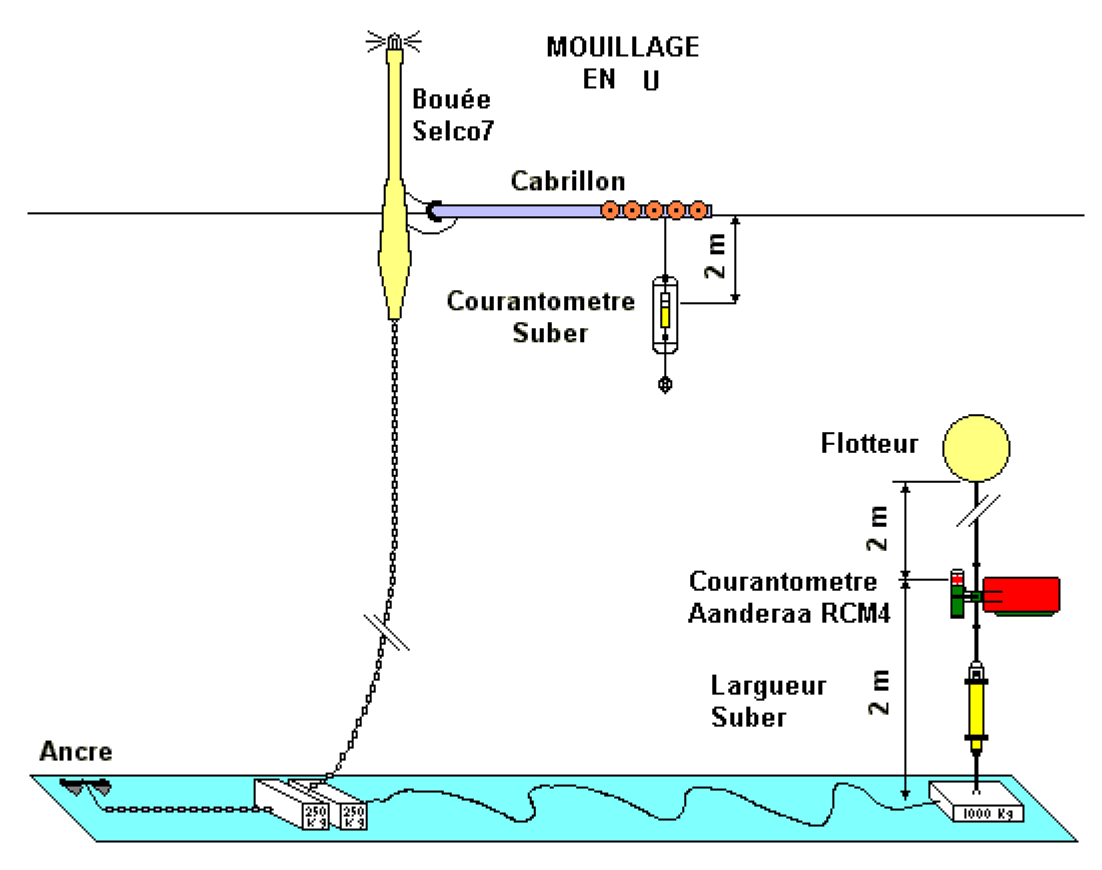


Figure 23 : Mouillage en "U"

- IV . 1 . 3 . 2 - Ligne mouillée en 3 points (mouillage tripode)

Pour réduire l'évitage de la tête de ligne, il est possible de faire se rejoindre en ce point, trois câbles, partants de trois ancrages placés en triangle. Un tel mouillage est complexe. Il demande de bons moyens de positionnement pour être mis en place.

- IV . 2 - MOUILLAGES DERIVANTS

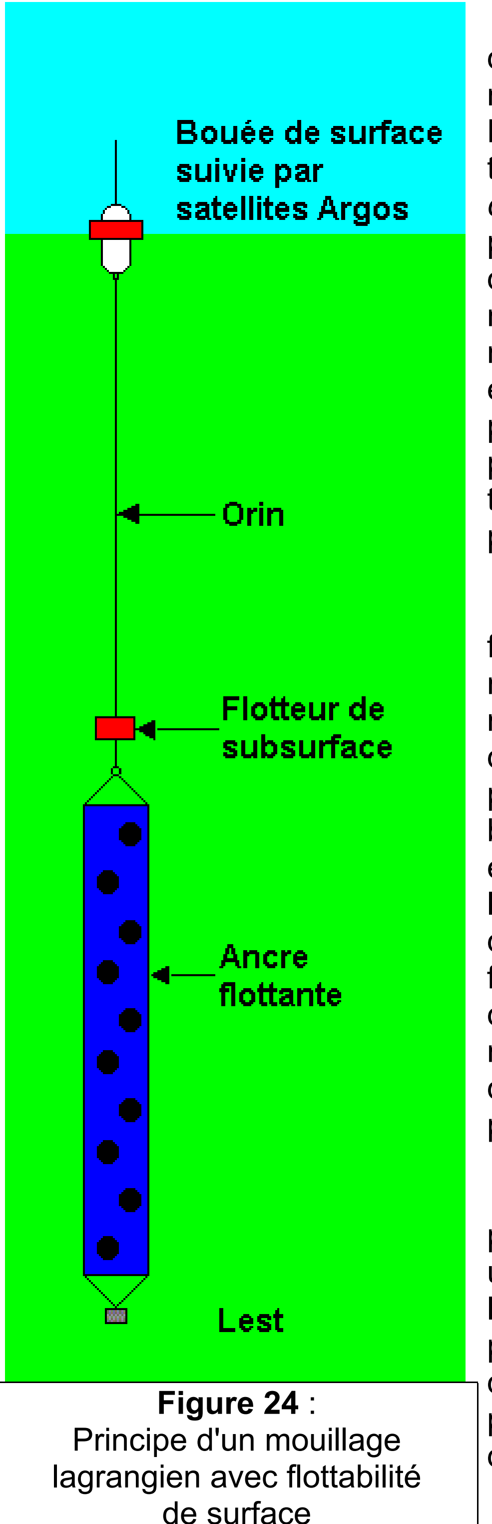


Figure 24 :
Principe d'un mouillage lagrangien avec flottabilité de surface

Ce type de mouillage est utilisé pour déterminer la dérive lagrangienne d'une masse d'eau entre la surface et 1000 mètres. Pour ce faire, une structure à très forte traînée qui est appelée ancre flottante ou *drogue* est maintenue immergée à la profondeur choisie ; on dit qu'elle est ancrée dans cette masse d'eau. Ce terme "*drogue*" nous vient de l'anglais "*drag*". Il existe de nombreux types d'ancres flottants, chaque équipe, voir chaque utilisateur, étant persuadée que celle qu'il utilise est la plus performante. Elles peuvent avoir l'allure d'une très grande chaussette (*holey sock*), d'un paquet de filets, d'un papillon...

Mais quelle que soit sa forme, l'ancre flottante est lestée à sa base afin de se maintenir verticale et sa partie supérieure est reliée par câble, appelé *orin*, à une flottabilité de surface. Cette flottabilité peut être partiellement ou entièrement due à une bouée. Cette bouée est équipée d'un émetteur Argos qui permet de suivre la localiser. La partie émergée offre un minimum de prise au vent et l'orin doit avoir le plus faible diamètre possible pour offrir le moins de traînée possible, ceci afin de suivre au mieux la masse d'eau à étudier. L'ensemble du mouillage est souvent appelé *SURDIFT* pour SURface DRIFTer.

La bouée ainsi que la partie de l'orin à proche de la surface peuvent être traités avec un revêtement antifouling efficace afin que leurs traînées reste longtemps le plus faible possible. Sans quoi, les flotteurs et la partie de l'orin proche de la surface se chargent progressivement d'une masse d'anatifes et d'algues.

La bouée suit plus ou moins les mouvements verticaux de la surface alors que l'ancre flottante reste pratiquement immobile. Il en résulte une fatigue et une usure des éléments de la ligne de mouillage qui peuvent provoquer sa rupture. Dans ce cas la bouée de surface dérive au gré des vents et des

courants de surface. Il est difficile - et parfois impossible - de savoir si la trajectoire obtenue correspond au déplacement de la masse d'eau ou à la dérive de la bouée sans son ancre flottante. Pour diminuer les risques de rupture entre la ancre flottante et la bouée, on utilise des câbles élastiques ou des Sandows qui absorbent les surtensions (au C.M.O./E.P.S.H.O.M.). Parfois, afin d'être sûr que l'ancre flottante est toujours en place, un ou plusieurs capteurs de température peuvent être placés au niveau de l'ancre flottante.

Les valeurs des températures sont transmises par Argos. Lorsqu'il y a rupture entre la bouée et l'ancre flottante, la liaison électrique avec le ou les capteurs est coupée et les valeurs de températures deviennent aberrantes. D'autres capteurs météorologiques comme la pression atmosphérique, la température de l'air, la vitesse et la direction du vent, etc. peuvent être ajoutés sur ces bouées.

En plus des forces de traînées parasites sur le câble et sur la partie immergée de la bouée, celle-ci est entraînée par la houle et sa partie émergée par le vent.

Avantages :

- Faible prix de revient et bonne autonomie (1 à 2 ans).

Inconvénients :

- L'ensemble est généralement perdu.

- V - MATERIEL UTILISE DANS LES MOUILLAGES

Nous abordons ici l'aspect technologique des éléments d'accastillage existants sur le marché. Nous présenterons succinctement ceux qui sont le plus couramment utilisés pour réaliser les mouillages. Nous distinguerons deux catégories, les éléments souples et les éléments rigides.

- V . 1 - LES ELEMENTS SOUPLES

Ce sont les chaînes et les câbles métalliques ou textiles. Après un aperçu de leurs caractéristiques, nous présenterons les plus couramment utilisés.

Qualités d'un élément souple :

Elasticité : Généralement une faible élasticité est intéressante, ce qui équivaut à un fort module de Young ; module qui s’exprime :

$$E = \frac{F}{S}\frac{L}{\Delta L}$$

Ou F est la tension, S la section, L la longueur considérée et ΔL l'allongement.

Cette élasticité donne une indétermination sur la mesure de la longueur des câbles, aussi certains les mesurent-ils sous une tension telle que :

$$T = \frac{d^2}{7}$$

Avec T tension en kg force, d diamètre du câble en mm.

Ténacité : C'est le rapport entre la résistance à la rupture Rp d'un câble et sa masse pour une longueur de 100 m. Elle doit être importante.

$$T = \frac{Rp}{m}$$

Température de fusion : Elle doit être élevée.

Fluage : C'est l'allongement dans le temps d'un câble soumis à une tension constante. Il doit être faible.

Perte mouillée : Certaines fibres voient leur résistance à la rupture diminuer lorsqu'elles sont mouillées. Pour les fibres synthétiques cette diminution est inférieure à 20 %, mais lorsqu'il y a des nœuds sur un cordage mouillé, les nœuds se souquent et le cordage peut voir sa résistance diminuer jusqu'à moitié !

Souplesse : Nécessaire pour passer dans une poulie ou pour enrouler le câble sur un touret de diamètre raisonnable. Le diamètre "d" de la poulie doit être au moins égal à 40 fois celui du câble "D".

$$D / d \geq 40$$

Propension à faire des coques : Les coques apparaissent sur les câbles qui ont pris des tours sur eux même au moment ou leur tension se relâche. Plus le câble est souple, moins les conséquences des coques sont gênantes. Par contre, sur les câbles manquant de souplesse, comme les câbles d'acier, l'apparition de coques peut entraîner la rupture. Sous tension, un câble cordé tend à se décommettre. Lorsqu'il soutient une charge, celle si se met à tourner. Quand la charge se pose (comme, par exemple, un corps-mort sur le fond), la tension dans le câble diminuant, des coques se forment sur ce câble. Si le câble est peu souple il y a une forte probabilité pour qu'il se rompe lorsqu'il sera à nouveau mis sous tension (au moment du relevage du corps mort).

Résistance à la fatigue :

Hystérésis :

Résistance aux bio salissures marines (fouling) : Ne concerne que la partie des mouillages proche de la surface recevant de la lumière. Pour les diminuer certains câbles sont recouverts d'une tresse de cuivre dont les oxydes toxiques ralentissent leurs apparitions (Paracuivre). Les organismes qui se développent sur les câbles attirent leurs prédateurs qui, en s'en nourrissant, peuvent endommager ces câbles. Les bio salissures marines augmentent la traînée des câbles.

Résistance aux morsures de poisson : Certains poissons mordent les câbles. Dans la zone épipélagique, entre la surface et 200 mètres, les requins peuvent les sectionner. Il semble que la couleur du câble ait une influence sur les attaques (les câbles en textile de couleur bleu seraient moins souvent coupés que ceux de couleur blanche). Plus profond, dans les zones mésopélagiques et bathypélagiques jusque vers 3000 mètres, d'autres espèces plus petites "mordillent" les câbles, et parviennent à couper les câbles en textile. Aussi, est-il préférable d'utiliser entre la surface et 3000 mètres des câbles d'acier.

Etat de surface : Comme la traînée d'un câble dépend de son état de surface il est plus intéressant d'utiliser ceux dont la surface est lisse (Parafil...).

- V . 2 - LES ELEMENTS RIGIDES

- V . 2 . 1 - Bouées et flotteurs

Suivant les règles du balisage, la partie émergée des bouées de surface doit être de couleur jaune. Elles sont équipées d'un feu et d'un réflecteur radar.

Les flotteurs de surface se présentent sous la forme d'une enveloppe étanche remplies de gaz L'enveloppe peut être métallique ou en matière synthétique. Le flotteur peut aussi être réalisé en matériaux expansés. Dans le cas il est composé d'une multitude de petits volumes étanches.

De même les flotteurs de subsurface sont constitués de volumes remplis de gaz. L'enveloppe est métallique ou en matière plastique pour les faibles profondeurs ; Lorsque la profondeur dépasse 1000 mètres, elle est en verre.

Elle peut se présenter sous la forme de deux hémisphères posés l'une contre l'autre. Les surfaces en contact sont suffisamment bien usinées pour assurer l'étanchéité entre l'extérieur et l'intérieur. Une dépression interne les maintient assemblées l'une contre l'autre (à pression atmosphérique et température normale). Elles sont placées dans une coquille en plastique armé qui les protège des chocs.

Le flotteur peut aussi être constitué d'une multitude de très petites sphères de verre noyées dans de la résine. Ce matériau est appelé mousse syntactique. Il permet de fabriquer des flotteurs de formes variées.

Dans le cas de mouillages de subsurface, le flotteur en tête de la ligne est de couleur vive afin d'être bien visible. Il est souvent équipé d'un émetteur Argos qui ne fonctionne qu'en surface (*watch dog*). Cela permet de savoir si le mouillage est remonté en surface, accidentellement ou volontairement, de le localiser par goniométrie et de le retrouver. D'autres engins de repérages sont parfois installés sur ces flotteurs : clignotant, réflecteur radar, pavillon, émetteur radio localisable …

- V . 2 . 2 - Appareils

Nous nous contenterons de donner une liste non exhaustive des appareils pouvant être placés dans les lignes de mouillage, en tête de ligne, en série, en parallèle ou posés sur le fond.

Il s'agit de courantomètres, de profileurs de courant à effet doppler, de chaînes de thermistances avec leur enregistreur, de marégraphes, de houlographes, de largueurs, d'enregistreurs C.T.D. (Conductivity, temperature , deepth)…

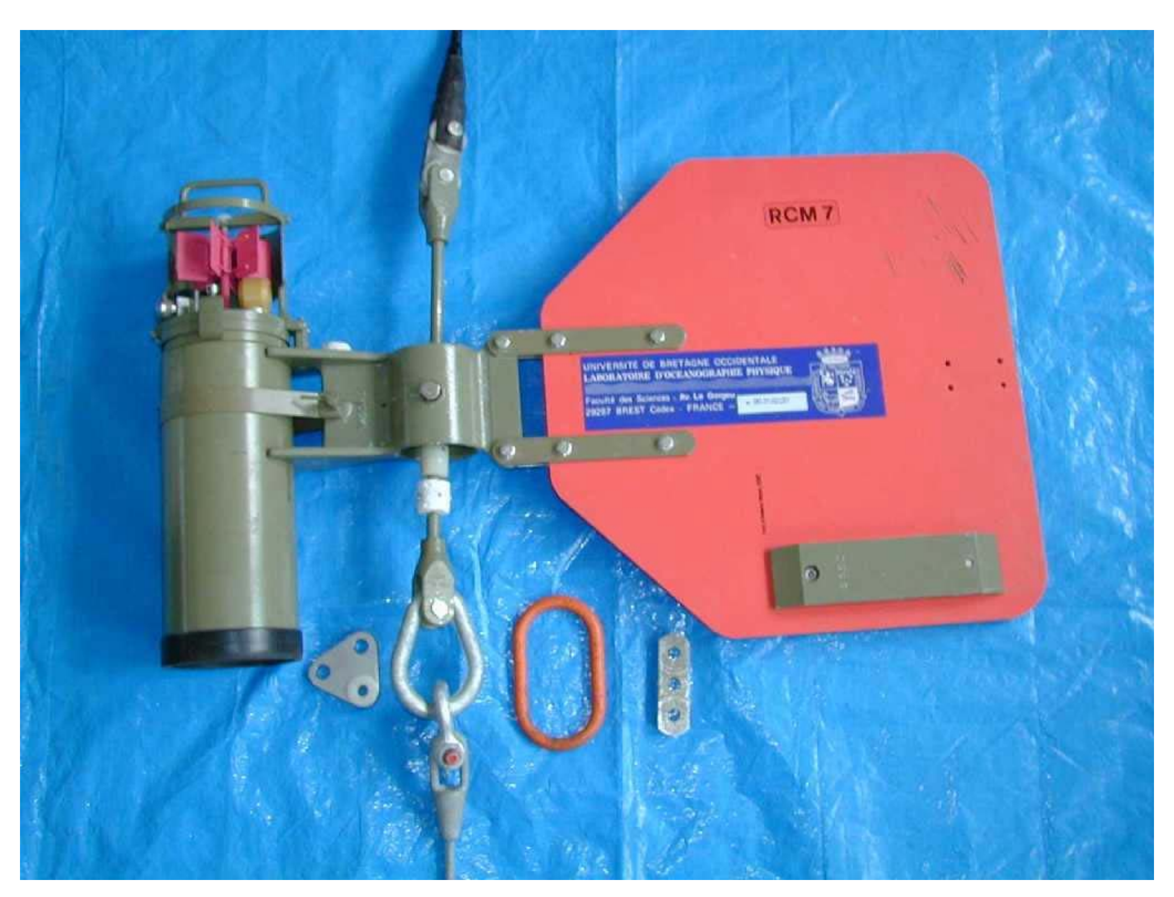


Figure 25 : Courantomètre Aanderaa RCM7 et divers éléments de liaison permettant de reprendre la tension dans la ligne de mouillage

- V . 2 . 3 - Largueurs

Le largueur est placé en bas de la ligne, au-dessus de l'ancrage. Il permet de récupérer la ligne de mouillage instrumentée en ouvrant la liaison mécanique qui la retient au fond. Pour cela, une commande acoustique codée en fréquence ou en binaire lui est transmise depuis un navire. Si l'appareil reconnaît le code, il actionne un moteur qui ouvre la ligne de mouillage. Il a existé des largueurs pyrotechniques ou un boulon explosif permettait l'ouverture de la ligne de mouillage. Plus simples de conception, ces models ont été abandonnés à cause des dangers qu'ils présentaient et de leur manque de fiabilité.

Les largueurs sont généralement aussi transpondeurs, c'est à dire qu'à un signal acoustique d'interrogation codé transmis par le navire ils renvoient, dès réception, un signal de retour. Le temps séparant l'émission du signal d'interrogation de la réception du signal de retour permet de connaître la distance entre le navire et le largueur.

Généralement les largueurs envoient un accusé de réception du signal commandant le largage ou un signal indiquant que le largage est effectué.

Pour augmenter la probabilité de récupération des lignes de mouillage deux largueurs peuvent être couplés sur la même ligne de telle sorte que le fonctionnement de l'un des deux permette la récupération de la ligne … et des 2 largueurs (voir figure 20).

- V . 2 . 4 - Corps-morts

La plupart du temps l'ancrage des mouillages eulériens est assuré par un corps-mort. Il peut être métallique (acier, fonte …)., en béton ou en béton feraillé.

Le corps-mort est le plus souvent abandonné sur le fond il doit donc être peu coûteux.

Corps-morts métalliques :

Nous utilisons de la ferraille de récupération disponible dans les « casses » : gueuses de fonte, roues de wagons ou de motrice, la chaîne …La densité de la fonte ou de l'acier est supérieure à 7 ce qui fait qu'un corps-mort réalisé avec ces matériaux a une vitesse limite de descente importante. En tombant, le corps mort entraîne des appareils de mesure. Certains d'entre eux ne supportent pas une vitesse trop élevée comme certains rotors de courantomètres qui se cassent. Danc ce cas, il faut limiter la vitesse de descente du corps-mort en lui ajoutant un parachute. Ceci complique le largage du corps-mort et augmente le coût de l'ancrage.

Corps-morts en béton :

Le béton est un matériau bon marché qui peut être coulé dans des coffrages de formes diverses. Sa densité est faible. Elle est le plus souvent inférieure à 2 ce qui fait que le poids dans l'eau d'un corps-mort en béton n'est même plus la moitié de celui qu'il a dans l'air. Lorsqu'il tombe, ce faible poids dans l'eau entraîne une faible vitesse limite en chute libre. Il n'est donc utile de lui associer un parachute. Il est possible de lui donner une forme anti-chalutage s'il doit être abandonné sur le plateau continental ; ainsi il n'occasionnera pas une croche supplémentaire.

Corps-morts en béton ferraillé :

Il est possible de charger le béton avec de l'acier ou de la fonte, comme par exemple de la chaîne d'acier. Il est ainsi possible d'obtenir un corps-mort facile à manœuvrer, de bonne tenue sur le fond et dont la densité permet l'économie d'un parachute.

La tenue d'un corps-mort dépend de la direction de la force qu'il exerce sur le fond.

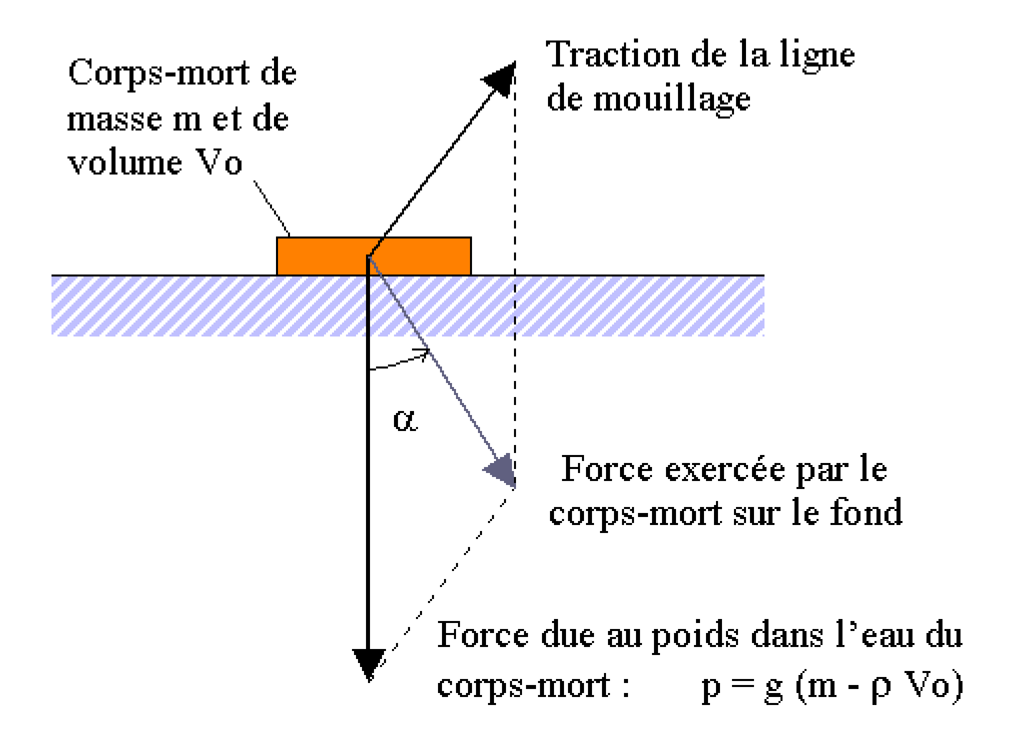


Figure 26 : Forces appliquées à un corps-mort.

α étant l'angle que forme la résultante avec la verticale, nous considérons que :

- $0 < \text{tg}\,\alpha < 1/2$ le corps-mort restera en place,
- $1/2 < \text{tg}\alpha < 1$ le corps-mort risque de déraper,
- $1 < \text{tg}\alpha < \infty$ le corps-mort dérape,
- $\alpha > 90°$ le corps-mort ne pose pas sur le fond, le mouillage est en dérive !

Pour éviter au corps-mort de déraper, il est possible de l'empenneler. Ceci consiste à ajouter une chaîne et une ancre appelée ancre d'empennelle (voir figure 19).

La tenue d'un corps-mort est améliorée s'il a une faible hauteur et surtout s'il a une surface importante en contact sur les fonds meubles. Il présente alors un « effet ventouse ».

- V . 3 - LES ELEMENTS DE LIAISON

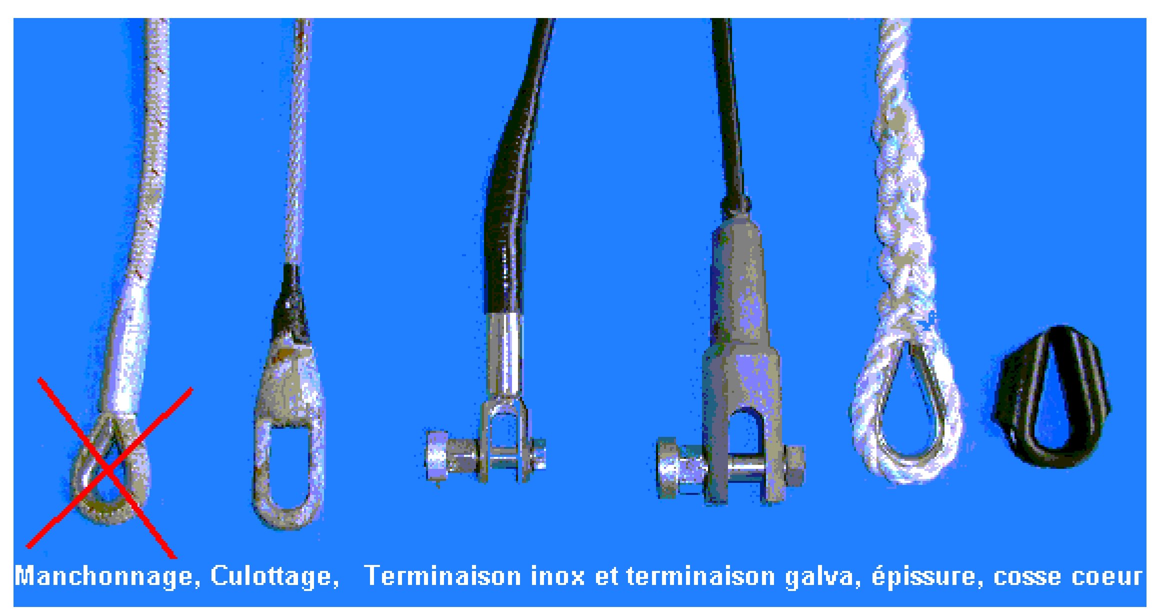


Fig. 27 : Terminaisons

La rupture des câbles soumis à des tensions exessives se produit généralement au niveau des terminaisons. Elles doivent donc être conçues pour que la perte de résistance à la traction soit minimale. Sur la figure 28 nous présentons quelques terminaisons auxquels nous allons nous intéresser, en allant de la gauche vers la droite.

- **Le manchonnage** : Il est à prescrire surtout sur les câbles présentant une élasticité ou pour les mouillages de plusieurs semaines. Dans le premier cas le câble en s'allongeant diminue de diamètre et il glisse dans le manchon. Dans le second cas le métal du manchon est attaqué par corrosion ou électrolyse d'où rupture à plus ou moins long terme.
- **Le culottage** : Ne convient qu'aux câbles en acier. Il est très résistant à la traction et à l'immersion. Comme la plupart des bonnes terminaisons il utilise le principe du coincement conique. Sa réalisation est décrite en annexe.
- **La terminaisons du type PARAFIL à coin conique** : Deux exemples sont donnés ici, une terminaison est en acier inoxydable, l'autre en acier galvanisé. Elles sont très résistantes si elles sont montées avec soin et bien conçues. Le cône femelle n'a pas exactement la même pente que le cône mâle, aussi des tentatives de copie qui n'en ont pas tenues compte ont entraîné des pertes ! Il également fortement déconseillé de placer de la résine au silicone sur les fibres entre les deux cônes. Ceci a pour conséquence de réduire de façon importante la résistance à la tension.
- **L'épissure** : Elle ne peut être exécutée que sur des câbles cordés. Elle est très résistante cependant, quand elle est sous tension, il arrive que certaines cosses cœur se mettent en travers et qu'elles coupent le câble. C'est pourquoi nous présentons une autre sorte de cosse qui ne présente pas ce défaut.

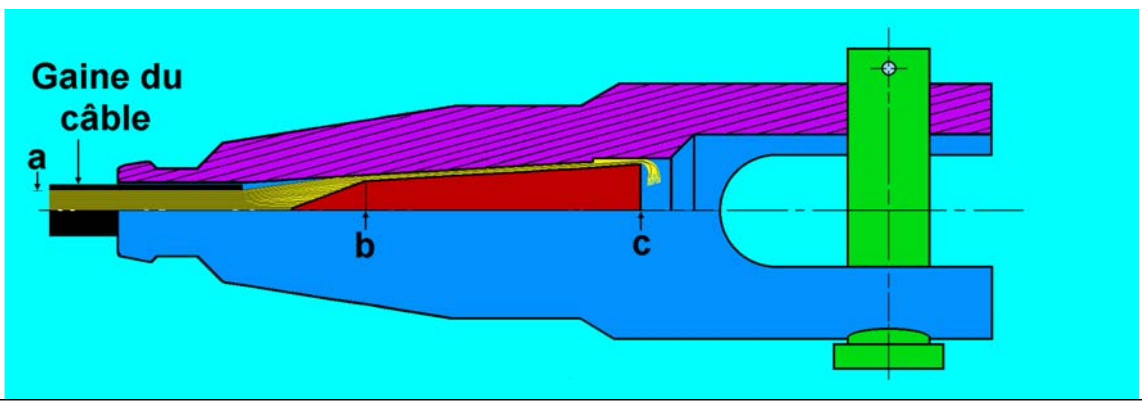


Fig 28 : Demi coupe d'une terminaison pour câble « PARAFIL » montée**.**

Remarque : La section occupée par les fibres en a, b et c est la même. La pente du cône mâle n'est donc pas la même que celle du cône femelle. Si « a » est le diamètre occupé par les fibres en « a », b_m le diamètre du cône mâle en « b » et c_m le diamètre de ce cône en « c », nous avons :

Diamètre du cône femelle en « b » : $b_f = \sqrt{{b_m}^2 + a^2}$

Diamètre du cône femelle en « c » : $c_f = \sqrt{{c_m}^2 + a^2}$

Si ℓ est la distance entre « b » et « c » :

Pente du cône male est : $\operatorname{tg}\alpha_m = \dfrac{c_m - b_m}{2\ell}$

Pente du cône femelle : $\operatorname{tg}\alpha_f = \dfrac{c_f - b_f}{2\ell}$

- V . 4 - MATERIEL UTILISE POUR LES OPERATIONS DE MOUILLAGE

Matériel utilisé pour mise à l'eau et relevage :

Portique ou grue,

Treuil Bouharmont ou « double barrel capstan winch »

Bosse américaine ou grenouille de tirage

Croc largable

…(chapitre en cours)

- VI - ANNEXES

- VI . 1 - RECUPERATION DES MOUILLAGES PERDUS

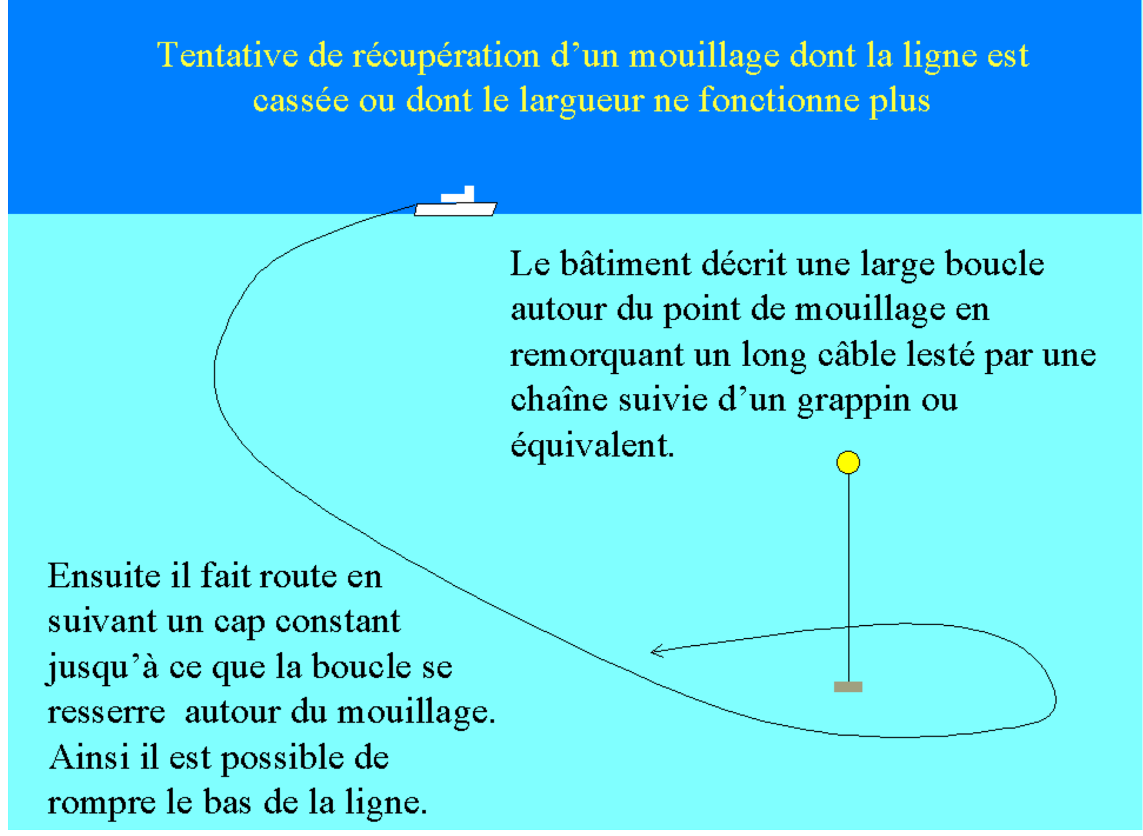


Figure 29 : Technique pour tenter la récupèration d'un mouillage

- VI . 2 - CORROSIONS

- La principale cause de corrosion sur le matériel immergé est due à l'électrolyse. Ce phénomène est difficile à éviter. Cette corrosion peut être définie comme étant une attaque destructive des métaux due à des réactions électrochimiques en présence d'eau de mer. Pour que cette corrosion se produise, 3 éléments doivent être présents :
- un matériau jouant le rôle d'anode,
- un autre le rôle de cathode,

- et une solution conductrice (l'électrolyte) qui, dans notre cas, est de l'eau de mer plus ou moins chargée d'oxydes métalliques.
Les ions métal (cations) quittent l'anode et vont à travers l'électrolyte vers la cathode. C'est donc à l'anode que la destruction du métal est la plus importante. Les métaux, selon leur nature, donneront plus ou moins de cations. Une mesure de cette tendance est donnée par la d.d.p. qui existe entre le métal et le potentiel de référence standard de l'hydrogène. Plus ce potentiel est faible, plus le métal aura tendance à se corroder.

Différents types de corrosions :

Corrosion uniforme (Uniform corrosion),
Corrosion caverneuse (Pitting),
Corrosion granulaire (Intergranular corrosion),
Corrosion galvanique (galvanic corrosion).

Potentiels galvaniques de métaux et alliages par rapport à une électrode au chlorure d'argent ($Ag\ Cl_2$). Cette électrode est utilisée comme référence en milieu marin. Il faut ajouter 0.25 V aux tensions indiquées sur le graphique si le potentiel galvanique l'hydrogène est pris comme référence. Ce graphique a été établi au Centre IFREMER de Brest par Dominique Festy. Ce sont les métaux les plus négatifs qui se détruisent en protégeant les métaux plus positifs. Pour certains aciers « inoxydables » il existe deux potentiels galvaniques, le moins négatif lorsque le métal rentre en contact avec l'eau de mer, l'autre après oxydation du métal. Ce sont les références américaines des aciers inoxydables qui sont utilisées ici.
Certains alliages changent de potentiel après oxydation.

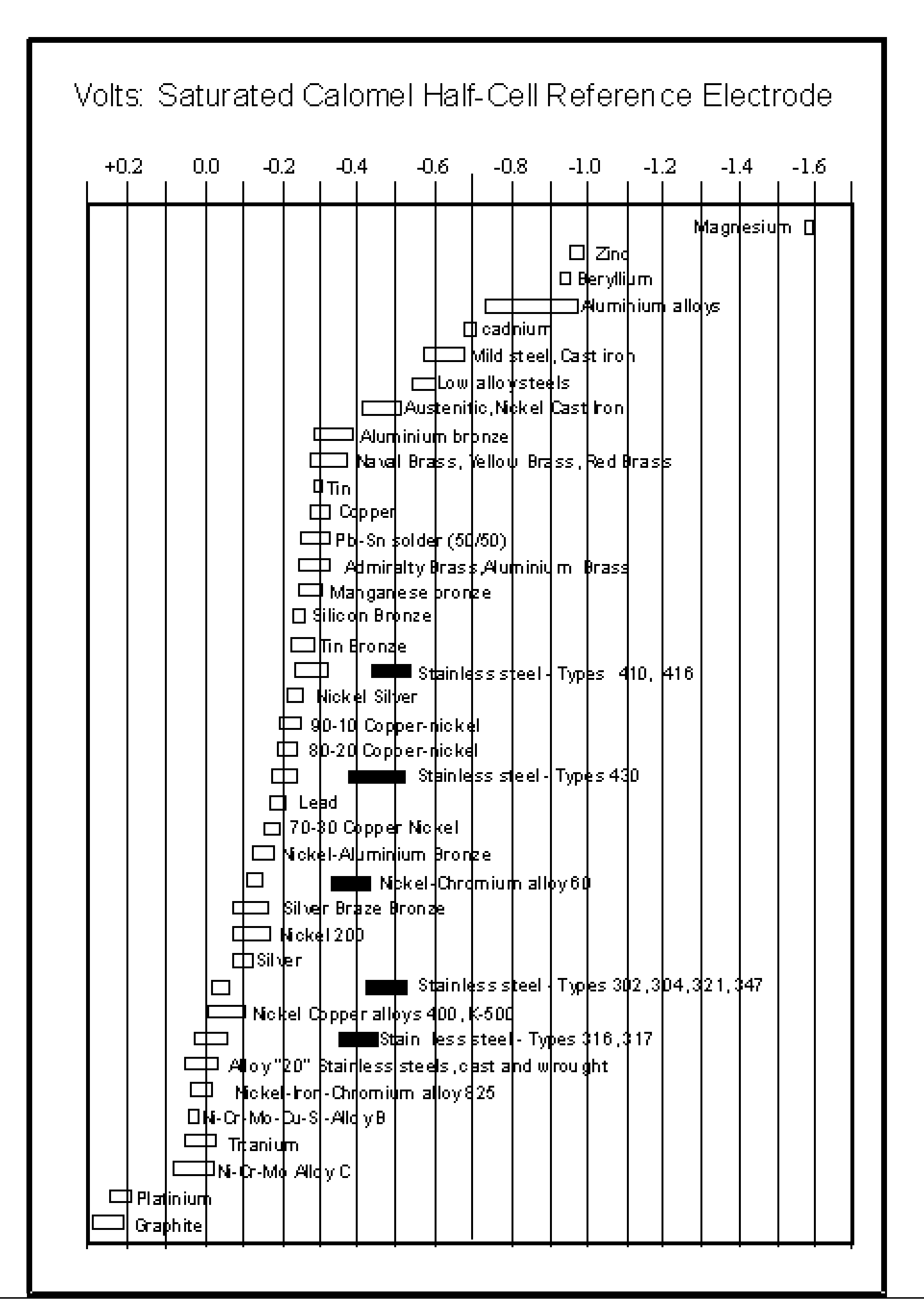


Figure 30 : Potentiel de quelques métaux et alliages par rapport à une électrode de référence au chlorure d'argent. Il faut ajouter 0.25V pour se référencer par rapport à l'hydrogène (Taleau fourni par Dominique Festy / Ifremer)



Figure 31 : Pieces d'acier "inoxydable" corrodées par un séjours en eau de mer

- VI . 3 - REMARQUES AU SUJET DES ACIERS INOXYDABLES

Les aciers inoxydables sont des alliages contenant du nickel. En présence d'oxygène un oxyde de nickel se forme à la surface et l'alliage ne se corrode pas. En immersion prolongée cet oxyde protecteur peut disparaître. Il ne peut pas se reformer car le milieu marin est pauvre en oxygène surtout par grands fonds. Il faut donc éviter d'utiliser l'acier inoxydable dans les mouillages, surtout s'ils doivent rester en place plusieurs mois.
Parmi un lot de pièces identiques provenant d'un même fournisseur, il arrive parfois qu'une d'elles remonte très oxydée (oxydation caverneuse ou granulaire) alors que les autres sont intactes. Les différents métaux qui composent ces alliages se détruisent entre eux par électrolyse. L'état de surface des pièces intervient sur ces corrosions. Plus elles sont lisses, mieux elles résistent. Certains produits, même sous forme de traces, peuvent servir de catalyseur et provoquer une attaque rapide de l'inox (comme certaines huiles hydrauliques).

S'il est indispensable d'utiliser un acier inoxydable ne prendre que des aciers "austénitiques" (au chrome, nickel et molybdène). Par exemple, suivant les normes AFNOR le Z2CND 17-12 (MO). Cette désignation signifie :

Z = Acier fortement allié
2 = 2% de carbone
C = Chrome (17%)
N = Nickel (12%)

D = Molybdène (le chiffre n'est pas donné car il y en a moins de 1%)

Désignation Ugine : MSM 21S
Autre désignation : 17/12 MO
Autre désignation : 17/12 MO
En boulonnerie : 18/12 MO

Autre acier inoxydable, moins résistant mais moins oxydable :
18/10 MO

- Un acier inoxydable doit être amagnétique (condition nécessaire, mais non suffisante).
- L'eau doit pouvoir ciculer librement autour du métal. Si l'eau n'est pas renouvelée la corrosion est plus importante.
- Plus l'eau sera riche en oxygène moins le métal sera attaqué.
- Une protection cathodique diminue la corrosion (anode en zinc).

- VI . 3 - MODE D'EMPLOI DE WIRELOCK

Reproduction de la notice du fabriquant :

Ce procédé qui permet le culottage des câbles ne demande que quelques minutes.

WIRELOCK est une résine polyester à durcissement à froid, pour culotter les câbles en acier. Elle consiste en une solution de divers polyester et styrène, mélangés à un remplisseur. Le remplisseur a une très haute chaleur spécifique, afin de disperser la chaleur produite par le procédé exothermique pendant le durcissement.

Le remplisseur WIRELOCK conduit donc la chaleur de façon correcte, et empêche d'éventuelles fissures pendant le durcissement de la résine.

La résine prend dans les 10 minutes suivant sa préparation, à une température d'environ 18°C.

Et cette résine a durci suffisamment dans l'heure qui suit, soit 1 heure 15 minutes après le mélange, le culottage acquiert 100% de la rupture du câble.

Ce durcissement du système de culottage WIRELOCK est influencé par la température : à température élevée, le durcissement est plus rapide qu'à basse température. La préparation du culottage peut être réalisée à une température légèrement inférieure à 0°C.

Le WIRELOCK a été rigoureusement testé pendant plus de 15 ans, et la preuve est faite que l'on peut réaliser des ancrages fiables de haute sécurité.

WIREL0CK.a été testé et approuvé par Lloyd's Register of Shipping.

Egalement, WIRELOCK est utilisé avec succès dans les applications suivantes :
Systèmes d'ancrage de tubes.
Culottages de haubans pour le dragage.
Culottages de haubans de gréements.
Culottages de lignes de remorquage.
Culottage de haubans de mâts d'émetteurs.
Culottages de câbles pour cloches de plongée sous-marine.
Culottages de câbles d'acier de ponts, constructions de toiture, etc...

Le WIRELOCK est résistant aux acides, à l'eau salée, l'huile, la graisse. Il faut éviter cependant les contacts avec des solutions alcalines fortes ou des acides forts. Il est recommandé de ne pas exposer de façon permanente les culots WIRELOCK à une température de 113 à 130 °C. bien qu'il ait été prouvé par une série de tests que le WIRELOCK est bien plus efficace que l'alliage d'étain à 130 °C.

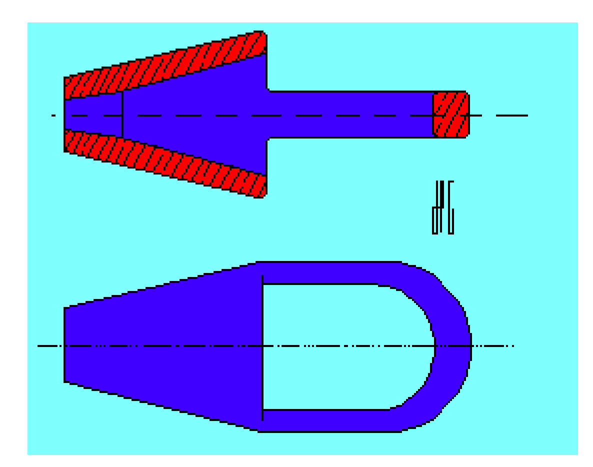


Figure 32 : Détail d'une douille pour culottage sur câble d'acier

1 Ligaturer le câble à la longueur désirée.

2 Epanouir l'extrémité en prenant soin de bien ouvrir les torons. Le cône ainsi formé doit être de 45° environ. Dégraisser soigneusement les fils avec un produit approprié (trichloréthylène) en évitant que celui-ci coule à l'intérieur du câble. Laisser sécher.

3 Tirer le câble à l'intérieur de la douille et veiller à ce qu'il soit centré par rapport à l'axe de la douille : Nous recommandons de laisser pendre sous la douille une longueur de câble suffisante. Obturer la base de la douille avec du mastic pour que le mélange ne coule pas. Pour les gros culots, renforcer avec quelques tours de ficelle ou petit cordage au cas où le poids du liquide serait supérieur à l'adhérence du mastic.

4 Verser toute la résine liquide dans un récipient en matière plastique. Verser ensuite tout le remplisseur dans la résine. Agiter pendant 2 minutes maximum pour obtenir un mélange homogène.

5 Verser sans attendre le produit ainsi obtenu dans la douille.

Après 10 minutes la douille peut être déposée et le mastic récupéré pour resservir.
Dans le cas de très gros culots et pour éviter les fuites à la base de la douille, commencer par verser une dose de 250 cm^3 et attendre la prise. Compléter ensuite avec un autre kit. Il n'y a aucune contre indication à utiliser plusieurs kits pour une seule douille.
La mise en service du câble peut être faite une heure après la prise du produit à 18°C.

ATTENTION : Activateur obligatoire pour basses températures.

CONTENANCE	De +9 à +13°C	De –3 à +9°C
250	½ dose	1 dose
500	1 dose	2 doses
1000	2 doses	4 doses
2000	4 doses	8 doses

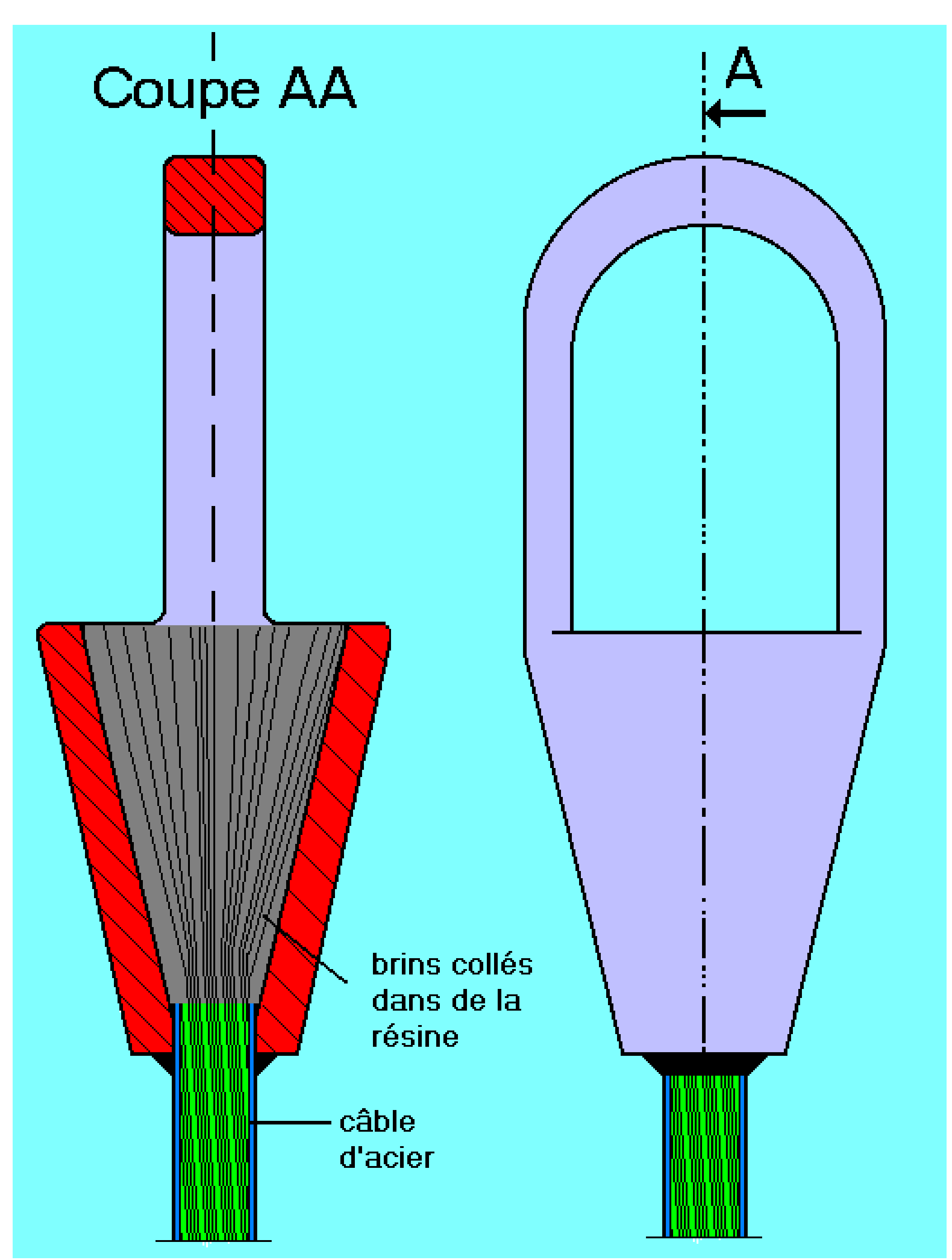


Figure 33 : Culottage